



Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна
Высшая школа технологии и энергетики



Энергоэффективность, как определяющий фактор при получении и использовании биотоплива второго и третьего поколения

Профессор Павел Луканин

Директор Высшей школы технологии и энергетики

ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ СРЕДИ ДРУГИХ ОТРАСЛЕЙ РОССИИ

Одна из **энергоёмких**
отраслей промышленности

Высокотехнологичная отрасль,
сохранившая технический потенциал

Занимает **четвертое место** среди других
отраслей промышленности, потребляя
5,7% тепловой и электрической энергии
от общей

Экспортно-ориентированная отрасль

Для российских ЦБК, построенных 40-50 лет назад, в условиях перехода на мировые цены на энергоносители, вопросы энергосбережения являются вопросом их конкурентоспособности на мировых и российских рынках

ЦБП России играет серьезную роль на мировых рынках, сохранив объемы производства продукции на уровне 1990 года, проведя при этом структурную перестройку всей отрасли и превратив её в экспортно-ориентированную отрасль.

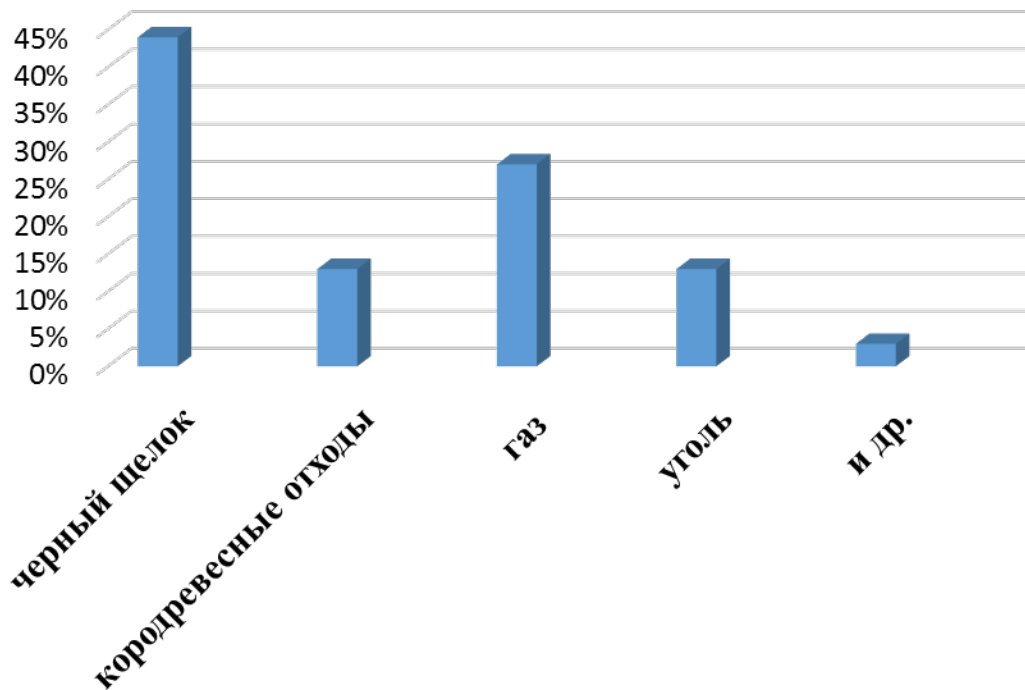
Потребление энергии в российской ЦБП

Потребление тепловой энергии низкого и среднего потенциала – 30 млн Гкал

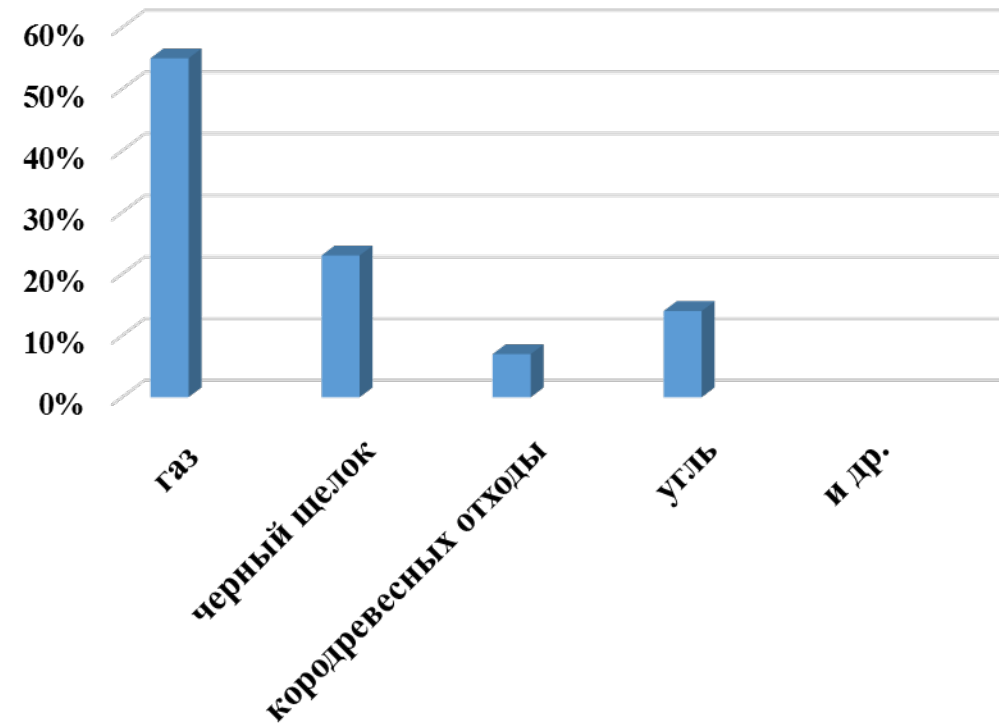
Потребление электрической энергии – 7 млн кВт ч

80% тепловой энергии и более 40% электрической энергии вырабатывается на самих предприятиях ЦБП

Структура топлива для производства тепловой энергии



Структура топлива для производства электрической энергии



22.03.2024

Технологические потоки ЦБП



Актуальная задача – снижение энергетических затрат в технологических потоках целлюлозно-бумажного производства – основной путь повышения рентабельности производства продукции

Существующие методы определения термодинамической эффективности и их недостатки

Метод тепловых балансов

- отражает лишь первый закон термодинамики;
- не учитывает качественную сторону теплоты.

Эксергетический метод термодинамического анализа

- устраняет недостатки метода тепловых балансов;
- отражает первый и второй закон термодинамики;
- не удается установить связь эксергетического КПД элемента с общим эксергетическим КПД сложной термодинамической системы.

Энтропийный метод (метод вычитания потерь)

- 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

Метод приращения эксергий

При составлении эксергетических балансов предлагается пользоваться



приращениями эксергии в процессе взаимодействия тепловых потоков

Математическая связь  эксергетический КПД отдельных видов оборудования
эксергетический КПД сложной тепловой схемы

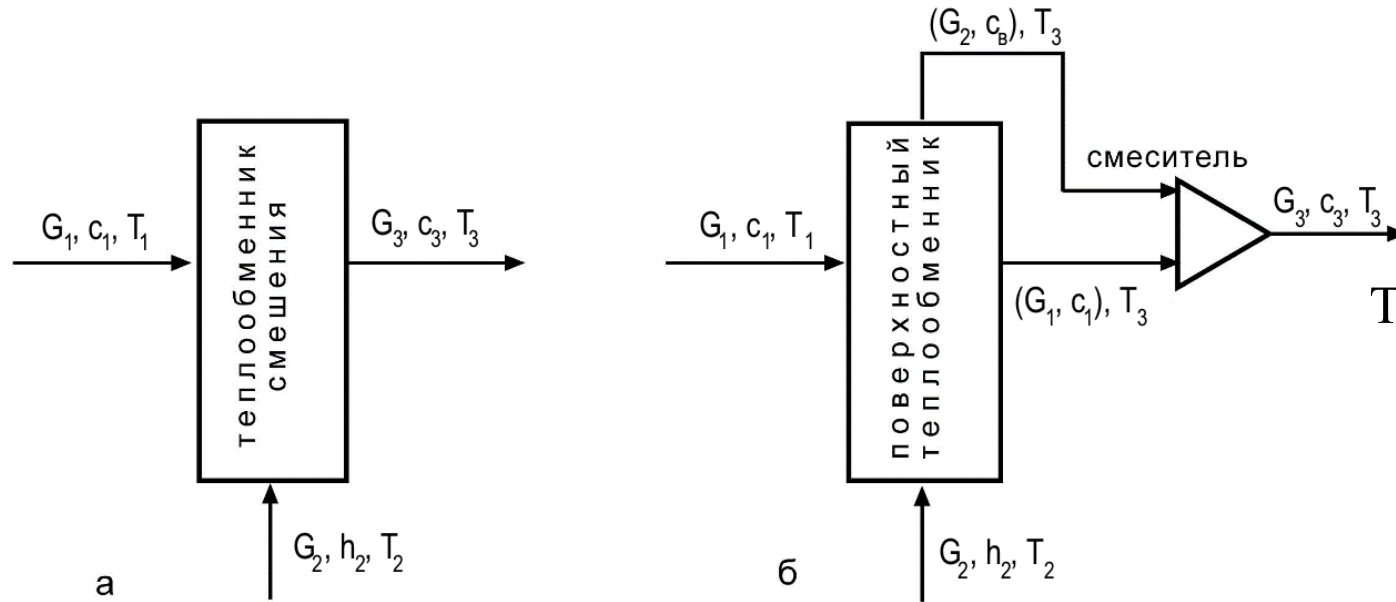
Эксергетический КПД теплообменного аппарата можно выразить как отношение приращения воспринятой эксергии (нагреваемый поток) к подведенной (охлаждаемый поток)

$$\eta_e^T = \frac{\Delta E_{qH}}{\Delta E_{qO}} = \frac{1 - \frac{T_{oc}}{T_H^T}}{1 - \frac{T_{oc}}{T_o^T}}$$

Для сложной тепловой схемы

$$\eta_e = \sum_m \frac{(\sum \Delta E_{qH})_m}{(\sum \Delta E_{qO})_m} = \sum (\eta_{em} \gamma_m), \quad \gamma_m = \frac{\Delta E_{qoi}}{\sum \Delta E_{qoi}}$$

Определение эксергетического КПД на примере теплообменника смешения



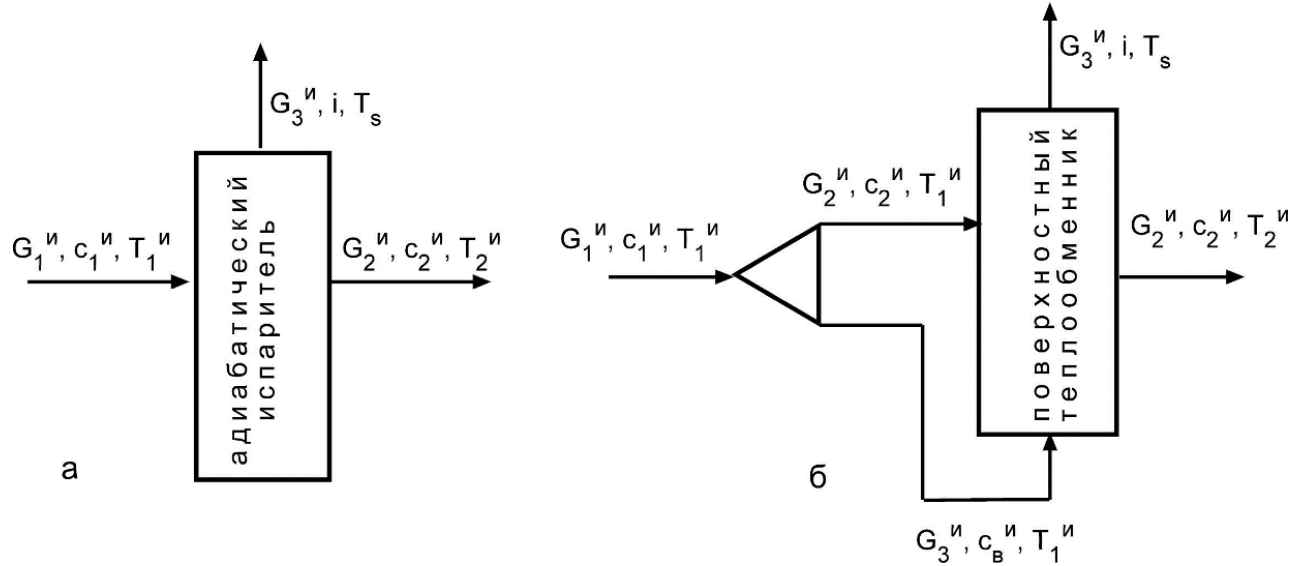
Тепловые схемы теплообменника смешения:

а - структурная; б — эквивалентная

Эксергетический КПД такого процесса равен:

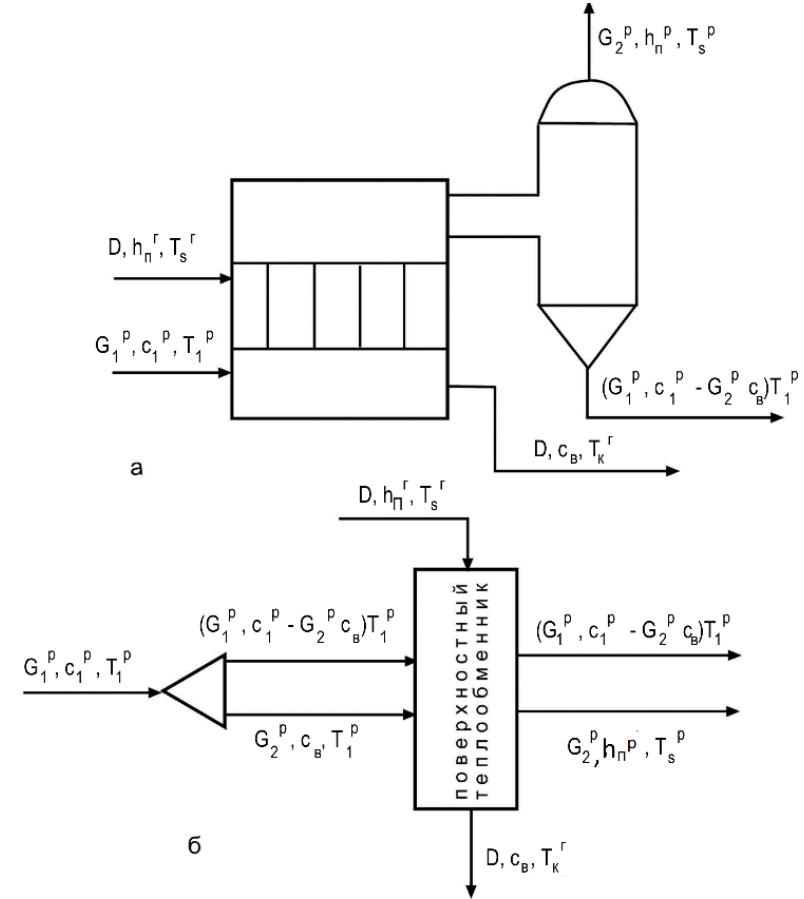
$$\eta_e^T = \frac{\Delta E_{qH}}{\Delta E_{qO}} = \frac{G_1 c_1 (T_3 - T_1)}{G_2 (h_2 - c_b T_3)} \frac{1 - T_{o.c} / T_H^T}{1 - T_{o.c} / T_O^T} = \frac{1 - T_{o.c} / T_H^T}{1 - T_{o.c} / T_O^T}$$

Определение эксергетического КПД на примере адиабатического самоиспарителя и выпарного аппарата



а - структурная; б - эквивалентная

$$\eta_e^T = \frac{\Delta E_{qH}}{\Delta E_{qO}} = \frac{G_3 (h - c^u T_1^u)}{G_2 c_2 (T_1^u - T_2^И)} \frac{1 - T_{o.c} / T_H^T}{1 - T_{o.c} / T_0^T} = \frac{1 - T_{o.c} / T_H^T}{1 - T_{o.c} / T_0^T}$$



а — структурная; б - эквивалентная

$$\eta_e = \frac{\Delta E_{qH}}{\Delta E_{qO}} = \frac{G_2^P (h_n^P - c_B T_1^P)}{D (h_n^s - c_B T_K^r)} \frac{1 - T_{o.c} / T_H^T}{1 - T_{o.c} / T_0^T} = \frac{1 - T_{o.c} / T_H^T}{1 - T_{o.c} / T_0^T}$$

Связь эксергетических потерь с расходом топлива в энергетическом котле

Количество энергии, введенной в систему

$$B \cdot Q_H^P = D_K + D_{CH} + L + \sum D_{im}$$

Эксергетические потери в котле приближенно можно представить

$$D_K = Q' - Q \cdot [1 - T_{o.c.} / T^T]$$

$$Q = B \cdot Q_H^P \cdot \varphi = D_{II} \cdot (h_{II} - h_{IIВ})$$

Тогда с учетом преобразования

$$B \cdot Q_H^P = (D_{CH} + L) / [(1 - T_{o.c.} / T^T) \cdot \varphi] + \sum D_{im} / [(1 - T_{o.c.} / T^T) \cdot \varphi]$$

Эксергетические потери можно вычислить из соотношения

$$D_K = \Delta E_{qo} \cdot (1 - \eta_e) \quad \text{Если КПД котла } \eta_e = 40\% \quad B = 2,5 \cdot D_K$$

Принципиальная схема производства сульфатной целлюлозы филиала группы «ИЛИМ» в г. Коряжма

10

и энергетические характеристики основных теплоиспользующих процессов

энергетический КПД технологии теплоты производства сульфатной целлюлозы низкий и составляет **48%**

основная доля затраченной энергии (**71,2%** от подведенной в схеме) относится к процессу регенерации щелочи в СРК.

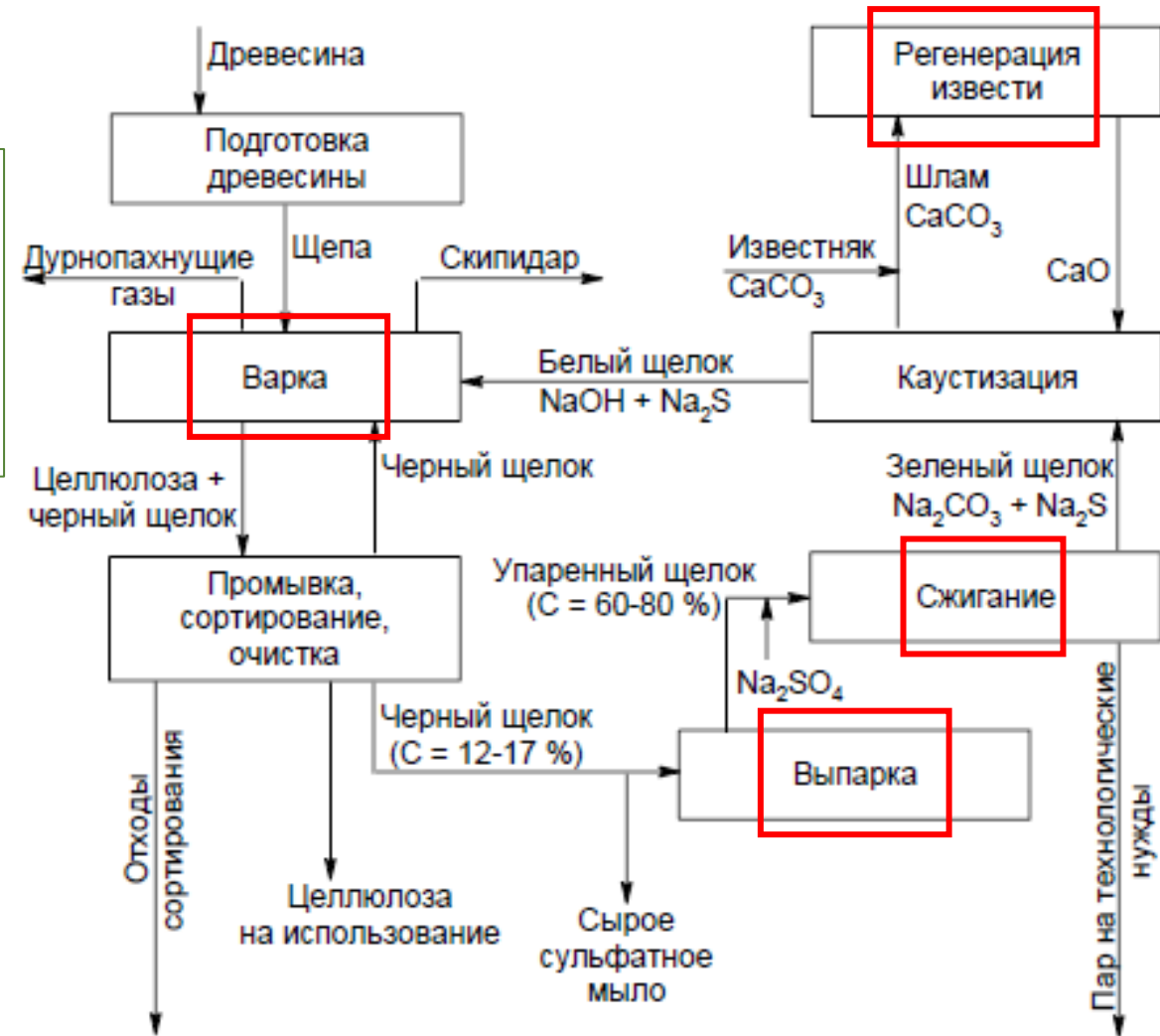
Энергетический КПД СРК -43%

Из них **53%** затрачивается на процессы выпаривания воды из раствора и получения водяного пара в котле с энергетическими КПД – **25 %** и **45%**, соответственно.

вторым теплоиспользующим процессом по величине затраченной энергии (**11,5%**) является процесс декарбонизации известняка, характеризующаяся низким (**37%**) энергетическим КПД

третьим теплоиспользующим процессом является выпаривание черного щелока. Величина затраченной энергии в процессе составляет **11,1%** при энергетическом КПД этого процесса **81%**

четвертым теплоиспользующим процессом по величине затраченной энергии (**6,3%**), является варка технологической щепы. Этот процесс характеризуется энергетическим КПД **69,4%**, что не отвечает современным требованиям



Для повышения эксергетического КПД процесса

Нагрев черного щелока и сырой технологической щепы в развитом контуре регенерации за счет использования теплоты сваренной технологической массы



Такой подход позволяет повысить эксергетический КПД до 90% с соответствующим снижением расхода пара от внешнего источника на порядок.

Перевод выпарных аппаратов на падающую пленку

Введение в схему выпарных аппаратов теплообменников смешения вместо поверхностных подогревателей

Решение проблемы накипеобразования

Применение тепловых насосов для исключения эксергетических потерь в окружающую среду, потерь от дросселирования острого пара на 1 корпус выпарной станции

Декарбонизация – передача теплоты от прокаленной извести к исходной шихте в циклонных холодильниках и от дымовых газов к воздуху в циклонных теплообменниках. Увеличение КПД до 80 %

Процесс декарбонизации известняка характеризуется очень низким эксергетическим КПД процесса - **37%**

От общей подведенной эксергии **28%** отводится в окружающую среду с материальными потоками и в процессах эндотермических реакций декарбонизации, а **72%** на:

испарение и перегрев водяных паров – **21%**;

обжиг извести – **19%**;

подогрев воздуха известью в рекуператорах – **32%**.

Эти процессы протекают с эксергетическими КПД **58%**, **64%** и **38,5%**

Выводы

Выполненный эксергетический анализ технологической схемы производства сульфатной целлюлозы позволил выявить наиболее «узкие» места в использовании тепловой энергии и обосновать основные направления повышения энергоэффективности рассмотренных процессов



Решение проблемы

Для повышения эксергетического КПД процесса декарбонизации рекомендована передача теплоты от прокаленной извести к исходной шихте в циклонных холодильниках и от дымовых газов к воздуху в циклонных теплообменниках

Применение торрефицированной древесины и древесного угля вместо мазута

При этом эксергетический КПД в этих процессах может быть увеличен до 80%

Биотопливо 2-го и 3-го поколения

Биотопливо 1-го поколения

ДРОВА

Плотность 200-300 кг/м³
Теплотворная способность
4000-5000 ккал/кг



Биотопливо 2-го поколения

ПЕЛЛЕТЫ

Плотность 600-800 кг/м³
Теплотворная способность
до 6000 ккал/кг



Биотопливо 3-го поколения

ТОРРЕФИЦИРОВАННЫЕ БРИКЕТЫ

Плотность ~1200 кг/м³
Теплотворная способность
8000-9000 ккал/кг

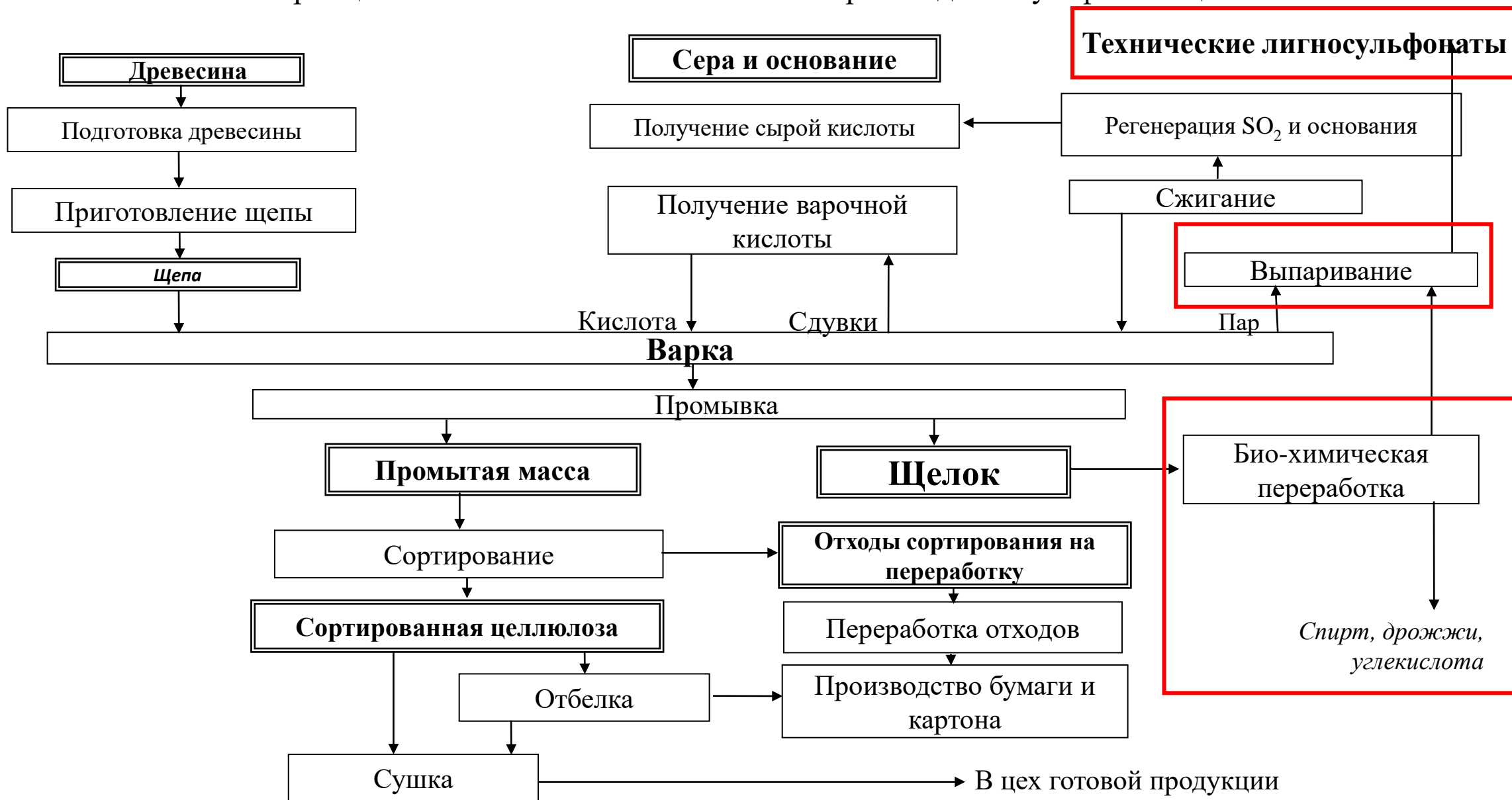


Опилочная горелка Dust Burner для ИРП

Опилки как топливо для ИРП:

- Технология ранее использовалась в энергетических котлах
- Дешевле по сравнению с газификацион установкой
- Сырье: пеллеты, опилки, древесная мелочь, кора и тд
- Теплотворная способность около 5 MW
- Специальные требования к опилочному топливу для ИРП:
 - Влажность макс. 10 %
 - Размер макс. 1.5 мм.
 - Содержание неорганических элементов макс. 1 %





Сульфитная целлюлоза

Термодинамические исследования технологической схемы получения лигносульфонатов проводились на современной выпарной установке ОАО «Выборгская целлюлоза».

Основные энергоемкие операции технологического процесса получения лигносульфонатов технических порошковых:

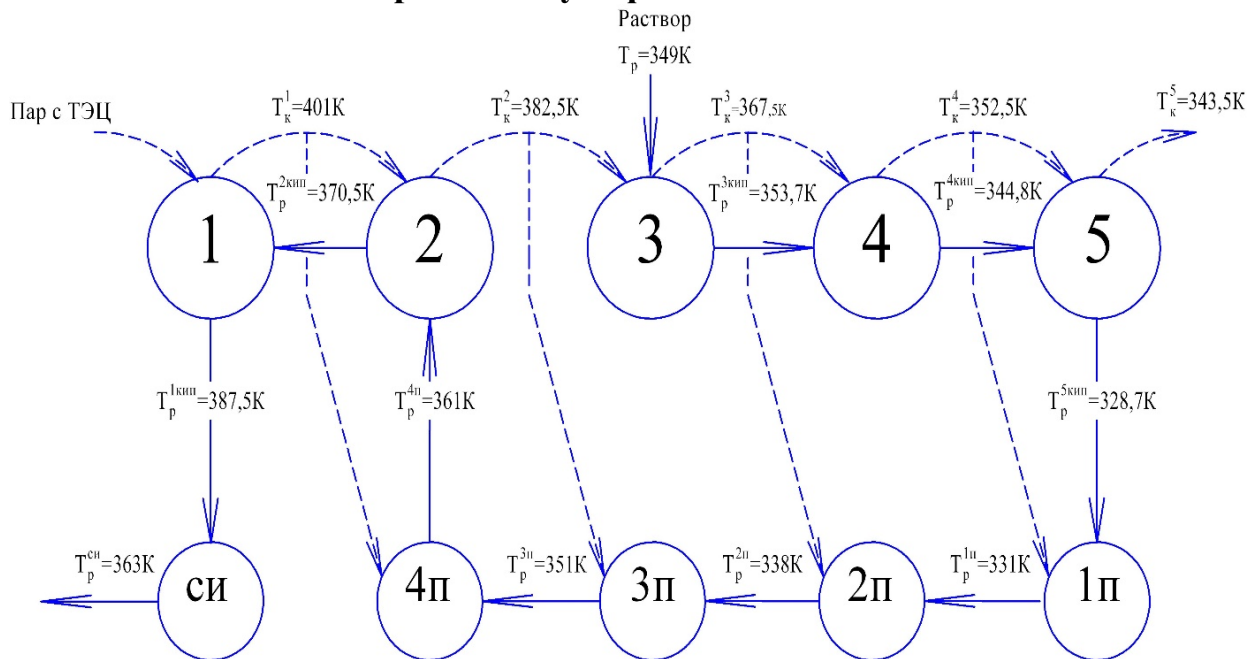
выпаривание раствора варки древесной технологической щепы до концентрации 38,5% абсолютно сухих веществ, $\eta_e = 75,4\%$

получение сушильного агента (топочных газов) в топке при сжигании природного газа или мазута

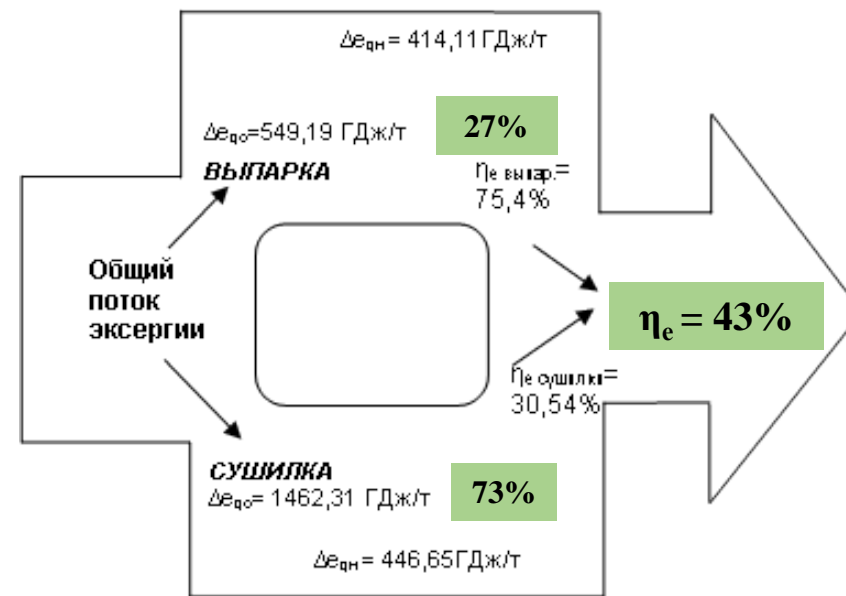
сушка укрепленных растворов в распылительной сушилке

$\eta_e = 30,5\%$

Выпаривание сульфитных щелоков



Структурная схема и температурный режим выпаривания сульфитного щелока действующего производства

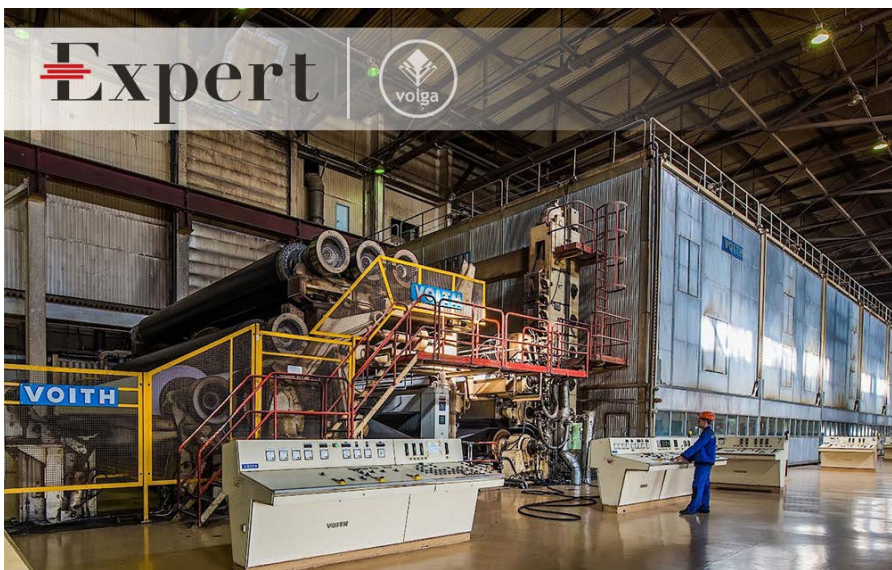


Эксергетическая диаграмма процесса выпаривания и сушки ЛСТ в распылительной сушилке

необходимость перераспределения доли затраченной эксергии в процессах выпаривания и сушки

Распределение энергии по функциональным частям БДМ

№ п/п	Наименование параметра	Сеточная часть		Прессовая часть		Сушильная часть	
		Привод	Вакуум-насосы	Привод	Вакуум-насосы	Электро-Энергия	Пар
1.	Распределение энергии, %	6	5	6	11	3	69
2.	Удаляемая влага, %	97,2		2,1		0,7	



22.03.2024

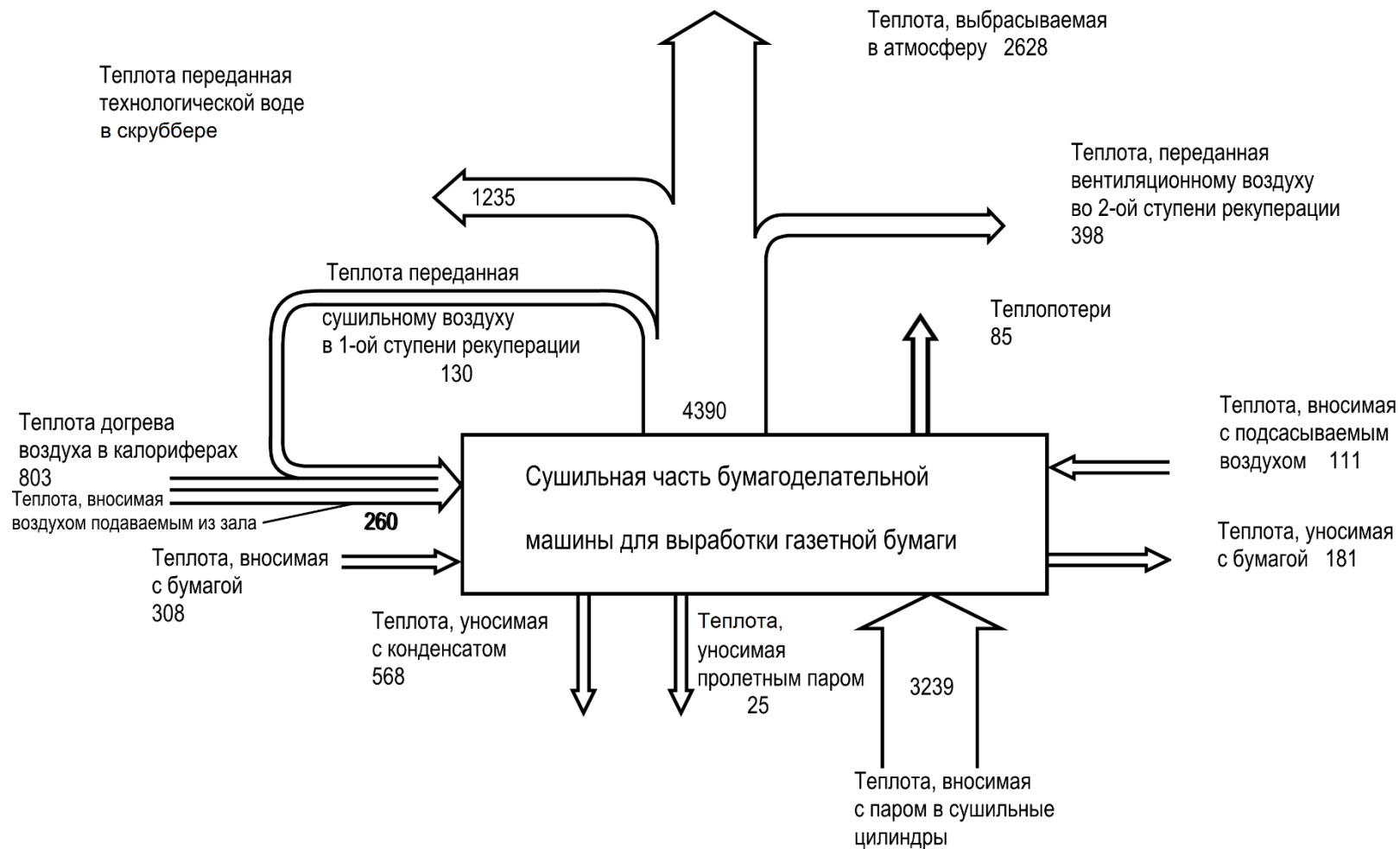
Анализ

в сушильной части машины удаляется всего **0,7%** от общего количества влаги, удаляемой в бумагоделательной машине.

Количество затрачиваемой энергии на удаление этой влаги составляет **72%** от общей подведенной энергии.

Из них **69%** - затраты энергии в виде пара низкого давления

Тепловой баланс сушильной части



В окружающую среду с ПВС отводится

60% от подводимой энергии.

Используется в скруббере **28%**,

на внутреннюю регенерацию

теплоты (на нагрев воздуха)

направляется лишь **12%**

подведенной теплоте

Эксергетические характеристики функциональных групп в сушильной части БДМ

Элементы оборудования	ΔE_{qoi} , кВт	ΔE_{qni} , кВт	γ_i	η_i , %	$\eta_i \cdot \gamma_i$, %	η
Сушильные цилиндры	3990,99	3368,53	0,353833	84,4	29,9	52,7
Водоотделители	638,284	625,454	0,056589	98	5,5	
Теплорекуперационная установка	3386,87	1947,44	0,300273	57,5	17,3	

Основные направления повышения эффективности

Повышение эксергетического КПД теплорекуперационной установки

Анализ статей эксергетического баланса показывает, что эксергетический КПД в этом процессе составляет 57,5%

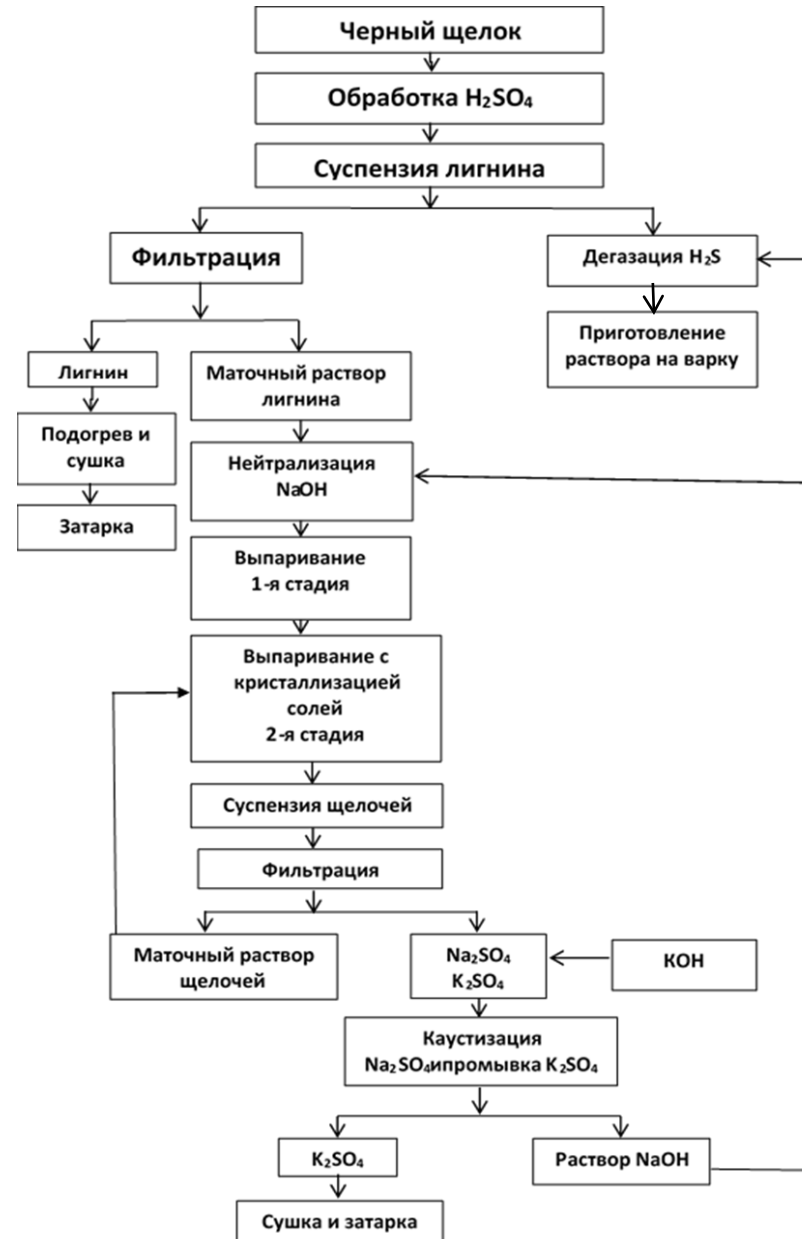
Снижение величины тепловых потоков, отводимых в окружающую среду. Как следует из теплового баланса 60% тепловых потоков отводится в окружающую среду

Повышение потенциала сушильного воздуха в процессе поглощения им влаги в сушильной части БДМ

Повышение сухости бумажного полотна, поступающего на сушку. Разработка наиболее совершенных схем утилизации низкопотенциальной теплоты ПВС, в т. ч. с применением ТНУ

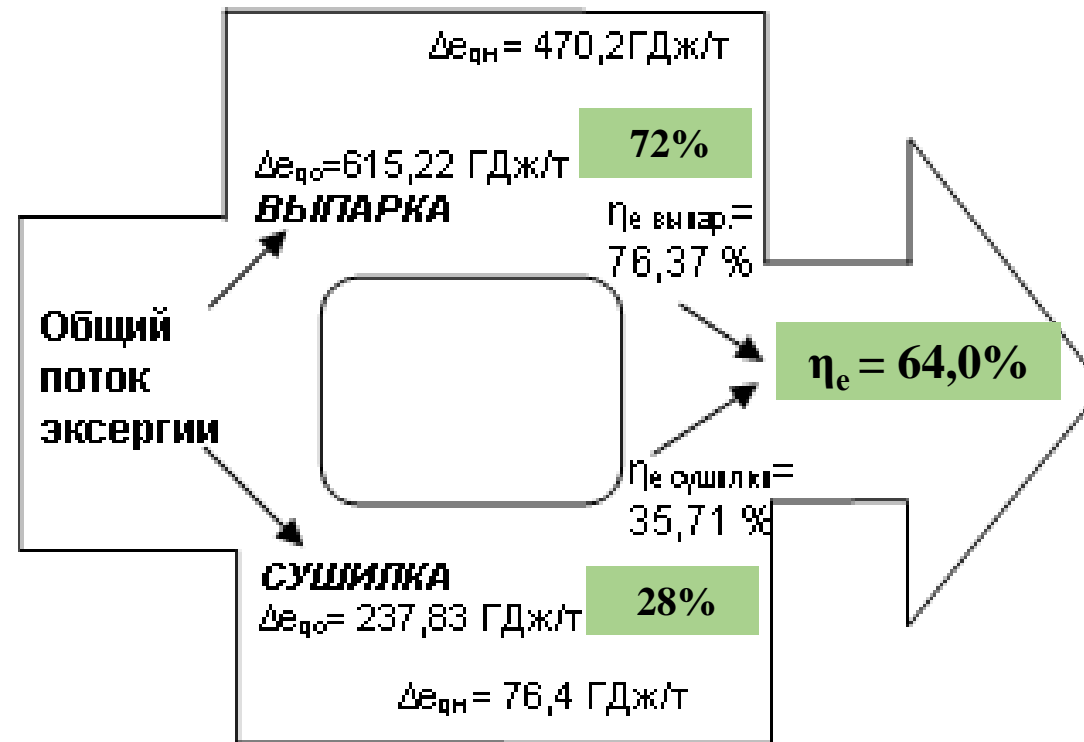
Разработка замкнутого цикла ПВС сушильной части БДМ

Схема и отдельные технологические процессы защищены 6 Патентами РФ



- установлено, что эксергетический КПД системы составляет 90 % против 48 % в существующей технологии;
- определены дальнейшие направления совершенствования технологии теплоты в процессе регенерации химикатов;
- снижение энергетических, капитальных и эксплуатационных затрат;
- экологическая безопасность – вывод СРК, печей декарбонизации известняка, каустизации содового раствора;
- углеродная нейтральность.

Эксергетическая диаграмма процесса выпаривания и сушки ЛСТ в грануляторе кипящего слоя

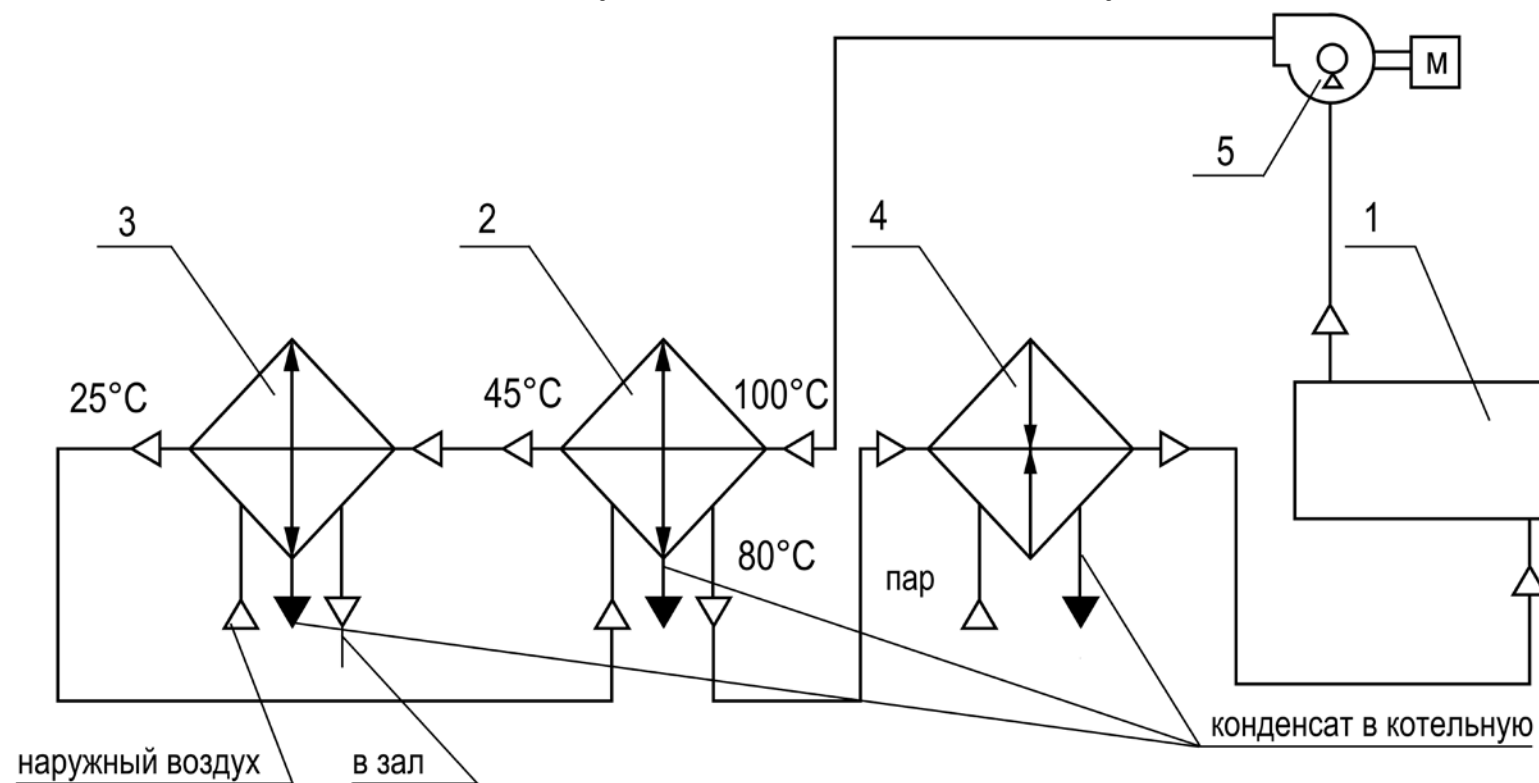


В процессе выпаривания затрачивается **72 %** эксергии от общей поведенной эксергии в систему при $\eta_e = 76,4 \%$

В процессе сушки сульфитного раствора затрачивается **28%** общей подведенной эксергии в систему при $\eta_e = 35,7\%$

Эксергетический КПД предложенной схемы **64,0%** существенно выше, чем на действующих целлюлозных заводах

Схема теплорекуперационной установки с замкнутым циклом сушильного воздуха



Общий эксергетический КПД установки **66,3%** против **28,6%** в существующей

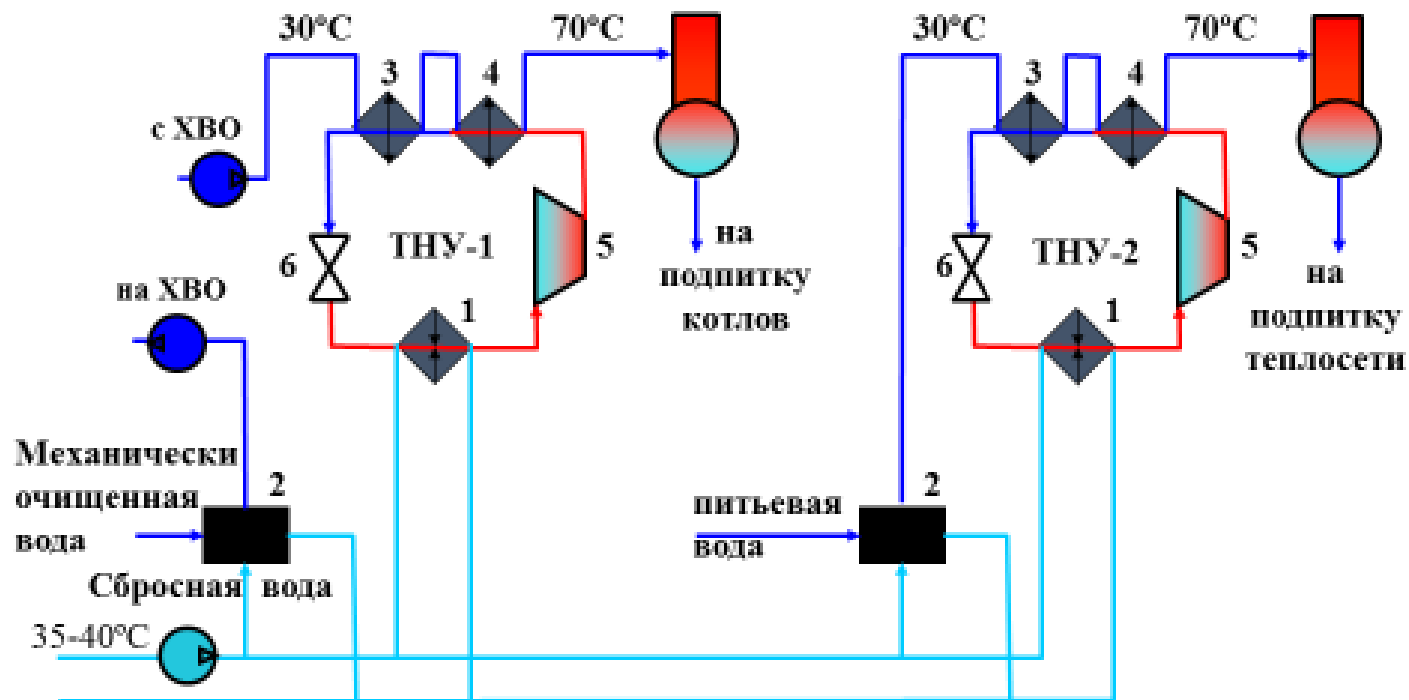
Процессы в теплообменнике регенеративного контура и калорифере, где подводится **91%** эксергии от подведённой в систему, характеризуются эксергетическими КПД **74%** и **64%**, соответственно

**Эксергетический анализ тепловой системы сушильной части БДМ 5
при замкнутом цикле сушильного воздуха АО Волга Балахнинского Бумкомбината**

Эксергетические характеристики	Группы сушильных цилиндров				Водоотделители			ТУ	Калорифер	Концевой холодильник
	1тр	1бр	2	3	1	2	3			
Тепловой поток, ΔQ_{i_2} , кВт	1891	2412	5397	684	689	863	118	2948	1072	1072
Приращение воспринятой эксергии, ΔE_{oi} , кВт	519	541,3	1098	113	198	240	29,1	412,1	245,1	33,4
Термодинамическая температура охлаждения, T_{oi} , К	398	398	393	388	398	390	388	346	437	308
Приращение затраченной эксергии, ΔE_{oi} , кВт	562	717	1548	190	205	244	32,7	559	385	97,5
Эксергетический КПД элементов, η_{i_2}, %	92	75,47	70,9	59,6	96,5	98,3	89,2	73,73	63,6	34,3
Доля затраченной эксергии, γ_i	0,12	0,155	0,34	0,04	0,04	0,05	0,007	0,12	0,084	0,021
Доля в общем КПД элементов, $\eta_i \cdot \gamma_{i_2}$, %	11,3	11,74	23,8	2,45	4,29	5,2	0,6	8,9	5,3	0,72

Общий эксергетический КПД сушильной части составил 74,4 % по сравнению с КПД 52,6 % существующей схемы

Теплонасосная станция для утилизации низкопотенциальной теплоты сбросной воды Светогорского ЦБК



- тепловая мощность ТНС – **40 МВт**;
- единичная мощность ТНУ – **10 МВт**;
- коэффициент преобразования – **4,0 – 4,2**;

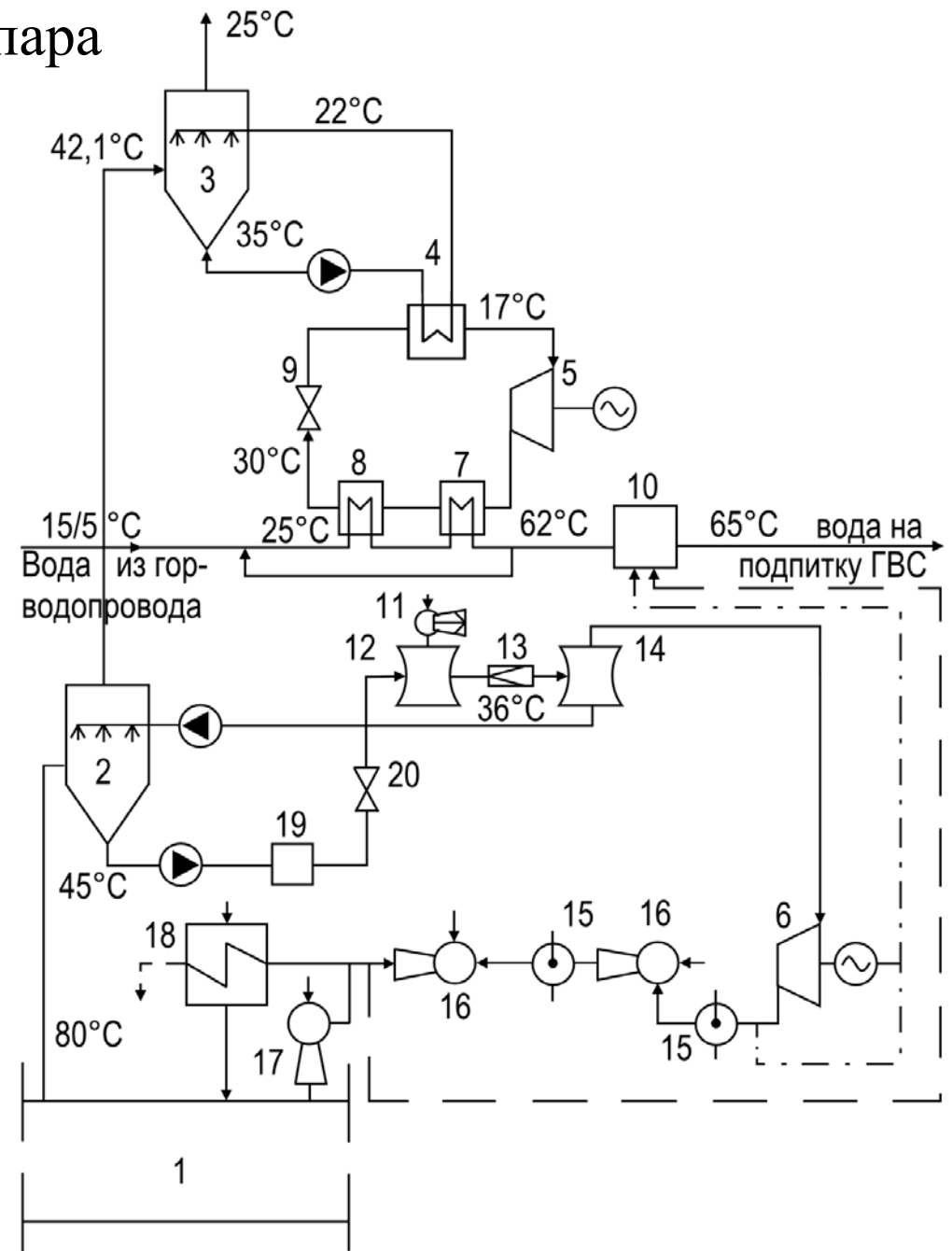
Установленная мощность электродвигателей – **2,6 МВт**.

Теплонасосная станция с применением установки прямого компримирования водяного пара

Теплопроизводительность ТНУ – 1 **10,4 МВт**

Паропроизводительность ТНУ – 2 **14,8 т/ч**

Средневзвешенный коэффициент преобразования **5,7**



**Внедрена в эксплуатацию теплонасосная станция на Светогорском ЦБК суммарной тепловой мощностью
40 МВт**

**Акт внедрения 1988 г. Гипробум;
Акт использования результатов научных работ 2011 г.**

**Переоборудование промышленно-отопительной котельной ОАО «Санкт-Петербургский картонно –
полиграфический комбинат» (Кнауф Петроборд) в ТЭЦ
Акт использования результатов научных работ 2013 г. Кнауф Петроборд**

**Изготовление, монтаж и испытания вихревого теплообменника смешения (Патент № 139592)
на промышленной выпарной батарее.**

Договор СН 164/16 от 07.06.2016 г. ООО «Городской центр экспертиз - Энерго» -ОАО «Архангельский ЦБК»

Разработанные промышленные способы повышения энергоэффективности технологии ЦБП
использованы и включены РАО «Бумпром» при подготовки информационно-технического справочника по
наилучшим доступным технологиям (производство целлюлозы, древесной массы и картона), документ по
сертификации (ИТС 1-2015), утвержден Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии,
Приказ № 1571 от 15.12. 2015 г.

Научная новизна подтверждена 12 Патентами РФ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!