

Ю. С. Иванов, А. Г. Кузнецов, В. Н. Селезнёв

ТЕХНОЛОГИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СУЛЬФАТНАЯ ВАРКА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

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

Ю. С. Иванов, А. Г. Кузнецов, В. Н. Селезнёв

ТЕХНОЛОГИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СУЛЬФАТНАЯ ВАРКА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА

Учебное пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2021

УДК 676:661.728(075)
ББК 35.77я7
И 200

Рецензенты:

доктор химических наук, профессор кафедры органической химии СПбГЛТУ
им. С.М. Кирова
Д. А. Пономарев;
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бумаги и картона
ВШТЭ СПбГУПТД
Л.Л. Пармонова

Иванов Ю.С., Кузнецов А.Г., Селезнёв В.Н.

И 200 Технология целлюлозы. Периодическая сульфатная варка с рекуперацией тепла черного щелока: учеб. пособие / Ю.С. Иванов, А.Г. Кузнецов, В.Н. Селезнёв. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. — 63 с.

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам дисциплин «Технология целлюлозы, бумаги, картона и композиционных материалов», «Технология производства целлюлозы», «Технология ЦБП», ч.1, «Технологические процессы автоматизированных производств» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 29.03.03 «Технология полиграфического и упаковочного производства», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», а также 18.03.01 «Химическая технология» (заочное отделение). Представлены сведения о периодической варке, основных операциях в работе котла, режимах периодической варки, а также представлены сведения о методах периодической сульфатной варки с использованием тепла черного щелока.

Пособие предназначено для подготовки бакалавров и магистров очной и заочной форм обучения.

УДК 676:661.728(075)
ББК 35.77я7

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2021
© Иванов Ю.С., Кузнецов А.Г.,
Селезнёв В.Н., 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ.....	4
1.1. Основные операции в работе варочного котла	5
1.2. Режимы периодической варки	8
1.3. Расход пара на варку	9
ГЛАВА 2. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СУЛЬФАТНАЯ ВАРКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА	11
2.1. Периодическая сульфатная варка по методу EnerBatch.....	13
2.2. Периодическая сульфатная варка по методу SuperBatch.....	15
2.3. Периодическая сульфатная варка по методу SuperBatch-K.....	19
2.4. Периодическая сульфатная варка по методу DuaLC.....	24
ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА	26
3.1. Укрупнённый баланс волокна по заводу, производящему хвойную беленую сульфатную целлюлозу	26
3.2. Древесно-подготовительный цех.....	27
3.2.1. Определение количества волокна для белёной целлюлозы по варке....	27
3.2.2. Определение суточной производительности по варке целлюлозы.....	28
3.2.3. Определение расхода древесины	28
3.2.4. Определение удельного расхода древесины	30
3.2.5. Определение количества утилизируемых отходов при переработке древесины в древесно-подготовительном цехе.....	31
3.3. Варочный цех. Материальный и тепловой баланс периодической сульфатной варки с рекуперацией тепла черного щелока	32
3.3.1. Загрузка щепы, заливка щелоков и пропитка.....	34
3.3.2. Заливка горячего белого щелока	38
3.3.3. Заварка	43
3.3.4. Варка	45
3.3.5. Вытеснение	49
3.3.6. Баланс сухих веществ на операции «Вытеснение»	51
3.3.7. Расчёт и подбор оборудования	53
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	62

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ

Периодическая варка — традиционный метод получения целлюлозы. Преимуществами периодической варки являются высокая надежность работы оборудования, гибкость и простота управления процессом, невысокая чувствительность к изменениям качества щепы — «всеядность», незначительные колебания степени провара, низкие эксплуатационные расходы.

Для периодической сульфатной варки применяют сварные варочные котлы, изготовленные из обычной углеродистой стали. Котлы для варки предгидролизной и изоляционной целлюлозы для лучшей защиты от коррозии изготавливают из биметалла.

На отечественных предприятиях работают котлы объемом 110, 125, 140, 160 и 200 м³. Диаметр котлов 3,6 – 4,5 м, высота 13,3 – 16,9 м. На зарубежных предприятиях, как правило, используются более крупные варочные котлы, объемом 200 – 400 м³. Преимуществом больших котлов являются уменьшение объема здания и сокращение затрат при строительстве. Все котлы теплоизолированы. Толщина слоя изоляции — 75 ... 100 мм.

Современные варочные котлы имеют систему принудительной циркуляции с непрямым нагревом (рис. 1).

Щелок забирается из-под круговой сетки 4, расположенной примерно на середине высоты котла 1, прокачивается циркуляционным насосом 2 через подогреватель 3, после которого подогретый щелок разделяется на две части.

Первая часть подается в верхнюю, вторая – в нижнюю часть котла. Производительность циркуляционного насоса должна обеспечить прохождение объема щелока, равного объему котла, 12 – 15 раз в час через теплообменник за время подъема температуры.

Поверхность нагрева рассчитывается таким образом, чтобы на 1 м³ объема котла приходилось 0,9 – 1,4 м² поверхности теплообменника.

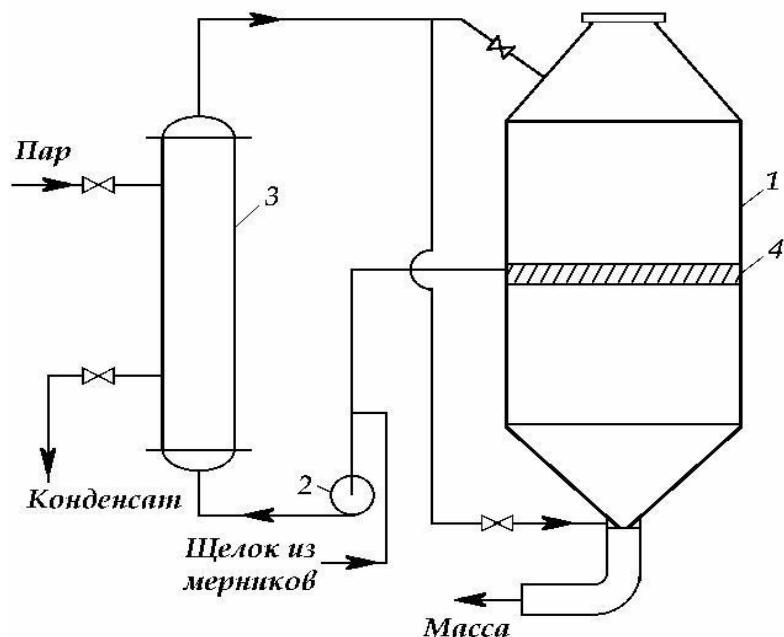


Рис. 1. Схема стационарного котла с системой принудительной циркуляции Эско: 1 – варочный котел; 2 – циркуляционный насос; 3 – подогреватель; 4 – круговая сетка

Крышки современных варочных котлов плоские или сферические с шаровым затвором и дистанционным управлением рассчитаны на рабочее давление 1,2 МПа и температуру 180 °С.

1.1. Основные операции в работе варочного котла

В отличие от варки непрерывного действия, у периодической варки появляется термин — оборот котла, под которым понимают суммарное время всех операции, начиная от осмотра и загрузки котла и заканчивая его опорожнением.

Традиционно оборот периодического котла составляет от 230 до 560 мин и складывается из следующих операций:

Осмотр котла (5 – 10 мин)

Проводится для котла и всей варочной установки для подготовки их к очередному циклу варки.

Загрузка щепы (30 – 60 мин)

Загрузка щепы начинается после установки воронки или телескопической трубы, соединяющей бункер с горловиной котла. Для увеличения количества загружаемой щепы производится паровое уплотнение.

Пар подается через специальное уплотняющее устройство, расположенное в верхней горловине котла. Часто для уплотнения используется заливка щелока с его циркуляцией, а также комбинированный способ пропарки с циркуляцией.

Применение пропарки щепы и заливки с циркуляцией позволяет увеличить объемную плотность загрузки до 0,35 – 0,42 пл. м³ древесины на 1 м³ котла.

Заливка щелоков (30 – 40 мин)

Обычно при заливке в котел температура белого щелока составляет 50 – 60 °С, черного 60 – 80 °С. Порядок заливки щелоков может быть разным. Целесообразно сначала задавать в котел небольшое количество черного щелока, затем полное количество белого щелока, исходя из принятого расхода активной щелочи и концентрации активной щелочи в белом щелоке, а под конец закачивать оставшееся количество черного щелока.

Объем белого щелока обычно составляет 0,25 – 0,3 объема котла. С учетом влаги в котле и конденсата от пропарки гидромодуль после заливки белого щелока составляет (2,2 – 2,5) : 1. Недостающее количество жидкости до заданного гидромодуля (3,8 – 4,5) : 1 восполняется черным щелоком из промывного отдела.

При расчете расхода щелочи на варку учитывается только активная щелочь в белом щелоке. Остаточная активная щелочь, содержащаяся в черном щелоке (5 – 8 г/л в ед. Na₂O), во внимание не принимается.

Нагрев котла (Заварка) (2 – 6 ч)

После загрузки щепы и заливки щелоков крышку котла закрывают, котел герметизируют и нагревают его содержимое путем циркуляции щелока через подогреватель. Нагрев производится в соответствии с графиком варки, принятым в технологическом режиме.

Период нагрева до конечной температуры (160 – 170 °С) называется заваркой. На современных предприятиях подъем температуры, последующая варка и другие операции контролируются и управляются системой автоматического регулирования технологическим процессом.

В период подъема температуры образуются различные газообразные продукты (метанол, метилсернистые соединения, скипидар и др.), которые создают в котле избыточное давление, не соответствующее температуре варки. Начиная со 120 °С, проводят так называемую терпентинную (скипидарную) сдувку, продолжающуюся до достижения температуры варки. При сдувке из котла удаляются воздух, водяные пары, скипидар. Сдувки направляют на установки для улавливания тепла и получения скипидара.

Варка (0,5 – 2 ч)

Варкой называют стоянку на конечной температуре. В этот период подачу пара в подогреватель прекращают, но циркуляция продолжает работать до завершения варки. Незначительные потери тепла, происходящие при варке, компенсируются выделением тепла за счет химических реакций. Конец варки определяется по времени.

По завершении варки в течение 30 – 45 мин проводится конечная сдувка, при которой давление в котле снижается с 0,8 МПа до 0,4 – 0,5 МПа.

Опорожнение котла (Выдувка)

Обычно котлы разгружают методом выдувки с полного или пониженного (если есть конечная сдувка) давления. Выдувка производится в выдувной резервуар, который представляет собой промежуточную емкость, где хранится

масса перед промывкой. Выдувной трубопровод, как правило, соединяет несколько варочных котлов (2 – 4) с выдувным резервуаром. При объеме котлов 110 – 140 м³ диаметр выдувного трубопровода должен быть не менее 250 – 300 мм. Выдувной трубопровод присоединяется по касательной к верхней части выдувного резервуара. Пары вскипания уходят через патрубок в верхнем конусе выдувного резервуара в ловушку, а затем в установку для улавливания тепла.

Емкость выдувного резервуара примерно в 3 раза превышает объем варочного котла. В нижней части резервуара есть мешалка. Если резервуар вводят в работу после ремонта, и в нем нет массы, то нижний конус заполняют черным щелоком. Выдувка в пустой резервуар не допускается, так как это приведет к поломке мешалки. Концентрация массы в выдувном резервуаре после выдувки 11 – 15 %. В нижней части масса разбавляется черным щелоком до 2,5 – 3,5 %. Разбавленную массу подают насосом на промывную установку. Полный оборот котла (сумма всех операций) составляет 2,5 – 8 ч.

1.2. Режимы периодической варки

При варке сульфатной целлюлозы в промышленных условиях может применяться медленная или быстрая варка. Решающим обстоятельством для выбора режима варки является совокупность таких факторов, как объем и тип котлов, мощность котельной, производительность циркуляционной установки, требования к качеству целлюлозы.

Медленной варке свойственны длительная заварка и варка при пониженной температуре и невысоком расходе щелочи. Медленная варка обеспечивает равномерный провар и сокращение расхода пара, медленную варку практикуют отечественные заводы, вырабатывающие целлюлозу для электроизоляционных и конденсаторных видов бумаг. Это объясняется необходимостью получения целлюлозы высокого качества с равномерным проваром, высокой прочностью и термостойкостью.

Быстрая варка используется при получении целлюлозы высокого выхода, жесткой, а иногда даже белимой целлюлозы. При этом расход щелочи выше и составляет 260 – 310 кг Na₂O на 1 т жесткой целлюлозы, 270 – 330 кг/т целлюлозы для технических бумаг и 320 – 450 кг/т белимой целлюлозы. Конечная температура варки оставляет 170 – 177 °С.

Основной признак быстрой варки — ускоренная заварка (45 – 50 мин для жесткой целлюлозы, 1 – 2 ч для белимой). Стоянка на конечной температуре обычно дольше, чем при медленной варке (1 – 2 ч для жесткой, 1,5 – 2,5 ч для белимой целлюлозы).

1.3. Расход пара на варку

Удельный расход пара при традиционной периодической варке обычно примерно в 1,5 – 2,0 раза выше, чем при непрерывной варке.

Факторы, определяющие расход пара на варку, разделяются на две группы: постоянные и переменные факторы.

Постоянные факторы:

- масса а.с. вещества древесины, загружаемой в котёл;
- тепло экзотермической реакции между древесиной и щелочью.

Переменные факторы:

- начальная температура белого и черного щелоков;
- гидромодуль варки – отношение общего объёма жидкости в процессе варки к массе абсолютно сухой древесины;
- вид и состояние теплоизоляции котла, трубопроводов, подогревателей;
- продолжительность и глубина терпентинных сдувок;
- продолжительность заварки;
- продолжительность варки;
- степень использования конденсата, вторичного пара.

В табл. 1 представлены затраты тепла на периодическую сульфатную варку. Общий расход тепла принят за 100 %, и каждая статья затрат тепла выражена в процентах к общему расходу.

Таблица 1 – Статьи расхода тепла на периодическую сульфатную варку

Статья расхода	Распределение расхода тепла, %
Нагрев:	
– абсолютно-сухой древесины и растворенных органических веществ	10,09
– влаги в щепе	15,24
– щелока и растворенных минеральных веществ	71,6
– корпуса котла	2,33
– теплоизоляционного слоя	0,52
Потери тепла:	
– с теплоотдачей	1,52
– с терпентинной сдувкой	8,22
Приход тепла от экзотермических реакций	- 9,62
Итого расход тепла	100

Основная причина более высокого расхода пара – повышенный гидромодуль, который при периодической варке составляет $(3,8 - 4,5) : 1$, тогда как при непрерывной варке – $(2,7 - 3,2) : 1$. Из-за относительно большего количества жидкости в котле соответственно увеличиваются затраты тепла на её нагрев.

При сульфатной варке имеется два источника тепла: тепло греющего пара и тепло, выделяющееся при реакциях щелочи с древесиной (тепло экзотермических реакций).

При обычных режимах сульфатной варки расход пара составляет 1,8 – 2,3 т на 1 т целлюлозы. Все это тепло расходуется в период заварки. Во время стоянки небольшие теплотери компенсируются приходом тепла от экзотермических реакций.

85 – 87 % всех затрат тепла составляет нагрев щелока и влаги в щепе. Поэтому меры, влияющие на эту статью расхода, дают наибольшую экономию. Снижение конечной температуры варки на 1 °С экономит примерно 1 % пара. Уменьшение гидромодуля на 10 % должно дать экономию пара около 10 %.

Однако наибольший эффект дает увеличение начальной температуры заливаемых в котел щелоков. Способы, основанные на подогреве щелоков за счет тепла отбираемого из котла черного щелока, позволяют сократить удельный расход пара на варку более, чем в 2 раза.

ГЛАВА 2. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СУЛЬФАТНАЯ ВАРКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА

В связи с тем, что главный недостаток периодической варки по сравнению с непрерывной – традиционная периодическая варка уступает непрерывной по удельному расходу пара и удельной производительности, в промышленности в последние 20-25 лет используются усовершенствованные способы периодической сульфатной варки, позволяющие существенно уменьшить расход пара на варку.

Применимость периодической варки связана с тем, что качество получаемой целлюлозы при периодической варке стабильнее, чем при непрерывной варке; это происходит, потому что щепка проваривается более равномерно. Из-за меньшего гидромодуля при непрерывной варке начальная концентрация активной щелочи выше. Это приводит к ускорению варки, однако равномерность провара целлюлозы ухудшается.

Другая причина неоднородности провара в котле непрерывного действия заключается в невозможности иметь одну и ту же температуру по сечению котла. Температура в центре котла выше на несколько градусов, чем на периферии, из-за этого процесс делигнификации происходит с разной скоростью в зависимости от места в котле.

Первым этапом на пути совершенствования периодической варки стал переход к технологии «холодной выгрузки массы», при которой масса выгружается из котла после вытеснения крепкого горячего черного щелока слабым черным щелоком в бак-аккумулятор, работающий под давлением. Затем этот вытесненный щелок используется на варку, а также на нагрев белого щелока и тёплой воды.

Данная технология обладает следующими преимуществами:

- 1) сокращается расход пара на варку (на 50...70 %);
- 2) на порядок снижается количество выбросов дурнопахнущих серосодержащих соединений в атмосферу;
- 3) повышается эффективность пропитки за счет более высокой начальной температуры процесса;
- 4) получаемая целлюлоза имеет более высокий выход и отличается высокими прочностными характеристиками;
- 5) снижается количество отходов сортирования;
- 6) улучшается промывка целлюлозы за счет дополнительной диффузионной промывки в котле;
- 7) повышается способность целлюлозы к отбелке.

Дальнейшее совершенствование технологии периодической варки привело к появлению четырёх модифицированных способов, применяемых в настоящее время: *RDH (Rader displacement heating)*, *EnerBatch*, *SuperBatch* и *DualC*.

2.1. Периодическая сульфатная варка по методу *EnerBatch*

Процесс *EnerBatch* – энергоэкономичная система варки с пропиткой белым щелоком. Эта технология по сравнению с обычной варкой благодаря пропитке щепы белым щелоком под давлением приблизительно 0,8 МПа и температуре 90 °С, приводит к уменьшению количества отходов, повышению выхода и равномерности провара целлюлозы. Кроме обычно применяемого для периодической сульфатной варки оборудования, варочный отдел оборудован аккумуляторами, работающими под давлением для горячего пропиточного щелока, горячего черного щелока, и баками для белого щелока и промывного фильтрата, работающими под атмосферным давлением.

После завершения загрузки котла щепой процесс начинается с «холодной» пропитки. Концентрация активной щелочи, необходимая для варки, первоначально создается введением рассчитанного объема свежего белого щелока с концентрацией активной щелочи 95...105 г/л в ед. Na₂O. Оставшийся объем варочного котла заполняется пропиточным щелоком с концентрацией активной щелочи 10 – 40 г/л в зависимости от требуемого числа Каппа целлюлозы после варки. Температура в котле после заполнения его пропиточным щелоком возрастает с 70 до 90 °С. В конце пропитки концентрация щелочи снаружи и внутри щепы выравнивается. Пропитка под давлением 0,8 МПа обеспечивает равномерное распределение активной щелочи по толщине щепы и является важным шагом на пути повышения равномерности провара.

В конце пропитки пропиточный щелок частично вытесняется из котла путем подачи в котел определенного количества горячего черного щелока с температурой 170 °С. При этом температура в котле быстро возрастает до 150...155 °С, далее температуру в котле поднимают до конечной с помощью пара, подаваемого в теплообменник или прямо в котёл. Давление в котле поддерживается на определенном уровне с помощью клапана, соединяющего

котел с баком-аккумулятором черного щелока. Во время варки надлежащее количество активной щелочи, необходимое для достижения низких значений числа Каппа после варки, достигается за счёт подачи горячего пропиточного щелока. Такая дробная подача активной щелочи на варку обеспечивает равномерную концентрации щелочи по ходу варки, что приводит к более селективной делигнификации и обеспечивает увеличение выхода целлюлозы и повышению её прочностных показателей.

После достижения заданного Н-фактора варка завершается вытеснением черного щелока фильтратом с промывной установки. Вытеснение идёт сверху вниз. Вытесняемый через циркуляционное сито щелок направляется в бак-аккумулятор горячего черного щелока. Способ вытеснения сверху вниз предотвращает образование каналов, обусловленных различной плотностью щелоков, и не требует большого количества фильтрата на вытеснение.

Вытеснение горячего крепкого щелока промывным фильтратом с температурой 85 °С представляет собой первую ступень промывки. Содержимое котла охлаждается до температуры 95 – 110 °С. Выгрузка целлюлозы из котла производится массным насосом при концентрации массы 5...6 %, т.е. по способу вымывки.

Технология периодической варки *EnerBatch* обеспечивает:

- 1) снижение расхода пара;
- 2) оптимальную систему вытеснения;
- 3) более высокую концентрацию сухих веществ в щелоке, поступающем на выпарку;
- 4) снижение количества отходов сортирования;
- 5) сокращение продолжительности варки и повышение производительности котла;
- 6) сокращение ступеней промывки целлюлозы;

7) сокращение выбросов метилсернистых соединений в окружающую среду на 90 %.

Существенным недостатком данной технологии является большой расход активной щелочи, так как пропитка осуществляется белым щелоком. Этим и обусловлена непопулярность данного метода.

2.2. Периодическая сульфатная варка по методу *SuperBatch*

Метод варки *SuperBatch* разработан на основе созданных ранее систем вытеснительной варки, он наиболее распространен и используется как при строительстве новых предприятий, так и при модернизации существующих.

На рис. 2 представлена технологическая схема варочного цеха, работающего по теплоэкономичной технологии *SuperBatch*.

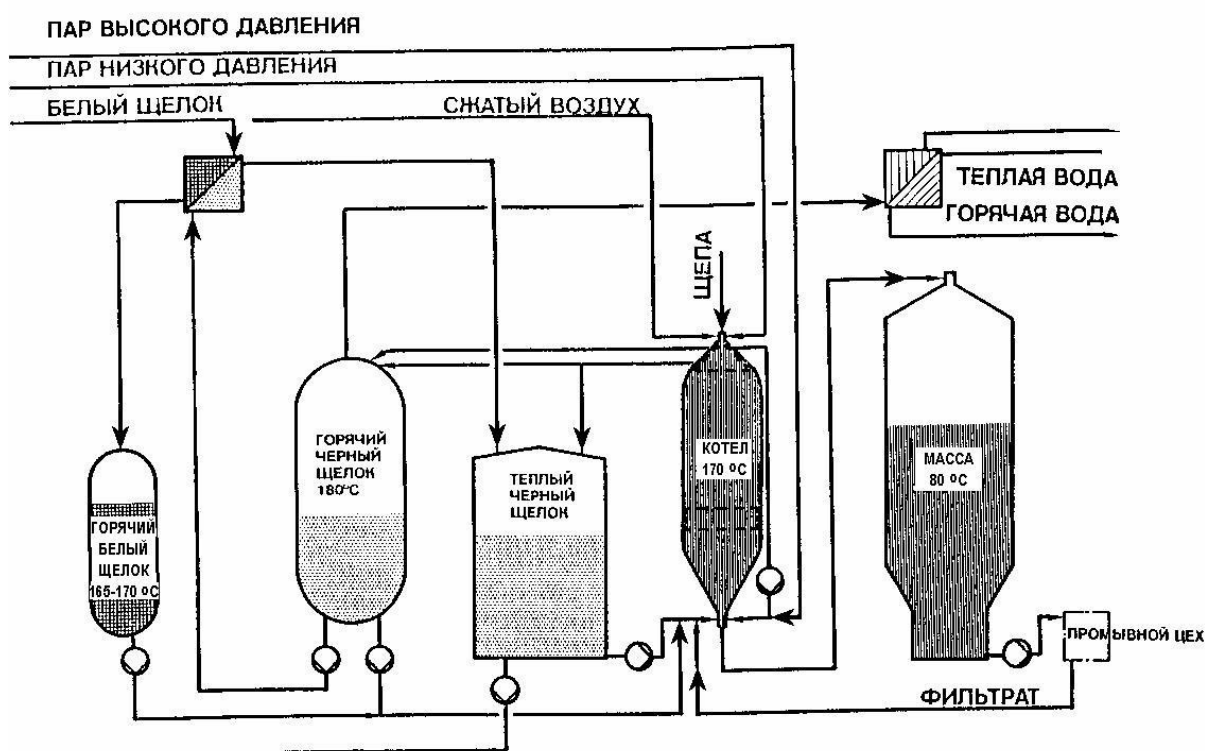


Рис. 2. Схема периодической сульфатной варки *SuperBatch*

Варочный котел отличается от обычного тем, что сетки для отбора щелока расположены в его верхней части. Циркуляция щелока осуществляется

путем его отбора из верхней части котла и подачи в нижнюю часть. Установка для утилизации тепла выдувки не требуется, однако необходимо дополнительное оборудование:

- бак-аккумулятор для горячего черного щелока, работающий под давлением, ёмкость которого равна количеству черного щелока от 2-4 варок;
- ёмкость для вытесненного черного щелока;
- бак-аккумулятор для горячего белого щелока, работающий под давлением;
- теплообменник для нагрева белого щелока горячим черным щелоком.

После завершения варки в нижнюю часть варочного котла насосом высокого давления подается фильтрат из промывного цеха (рис. 3, поз. 1).

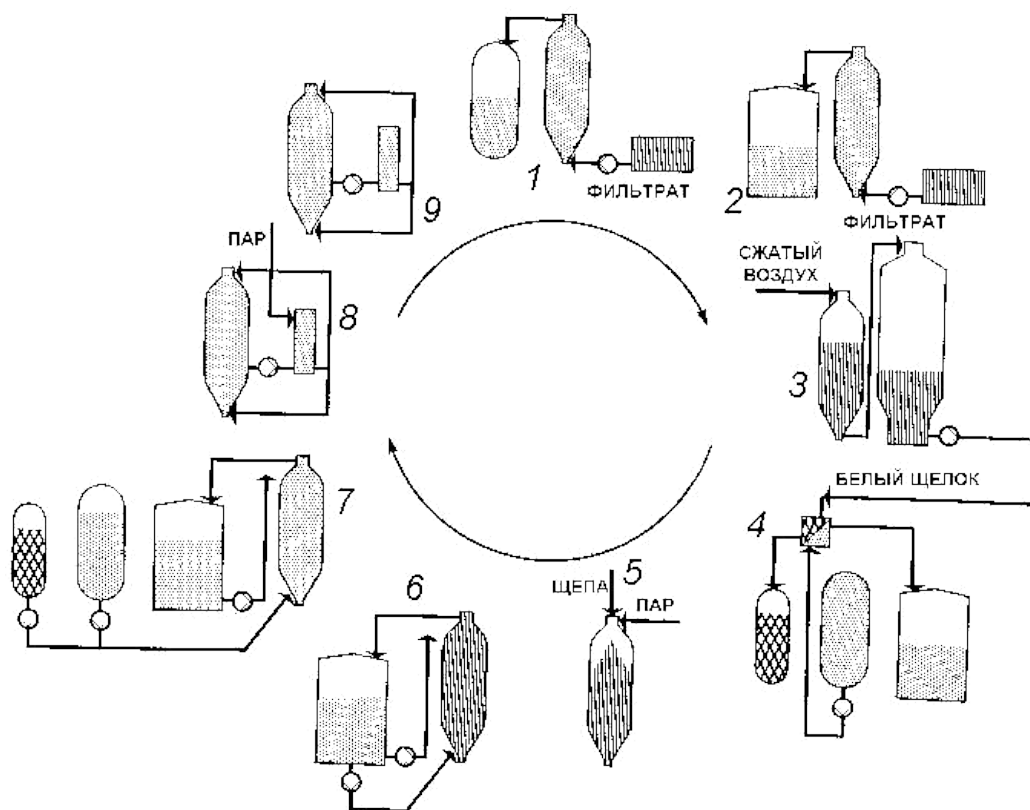


Рис. 3. Основные операции технологии **SuperBatch**

Одновременно из верхней части варочного котла в бак-аккумулятор отбирается вытесняемый горячий и крепкий черный щелок.

В конце вытеснения температура вытесняемого щелока резко снижается. Самая холодная часть вытесненного щелока направляется в ёмкость для черного щелока (поз. 2).

После завершения вытеснения температура в варочном котле уменьшается до 90 – 95 °С. Разгрузка целлюлозы осуществляется либо выдавливанием массы сжатым воздухом, либо с помощью насоса (поз. 3).

Белый щелок, поступающий в варочный цех, нагревается в теплообменниках горячим черным щелоком и хранится в баке - аккумуляторе белого щелока, работающем под давлением (поз. 4).

Варка начинается с заполнения котла щепой и пропарки (поз. 5). Воздух из котла отводится вентилятором. Затем в котел закачивается тёплый (с температурой около 100 °С) черный щелок, который нагревает щепу и удаляет из нее воздух. Тёплый щелок циркулирует через варочный котел и ёмкость для теплого щелока.

После заливки тёплого черного щелока в нижнюю часть котла подают горячий черный щелок и необходимое количество горячего белого щелока (поз. 6). Одновременно тёплый черный щелок вытесняется из верхней части котла обратно в ёмкость тёплого черного щелока. Во время заливки горячего щелока давление в котле поднимают до уровня, соответствующего температуре щелока (поз. 7).

После заливки щелоков подъем температуры до конечной осуществляется путем циркуляции щелока через подогреватель (поз. 8). По завершении стоянки на конечной температуре начинается вытеснение горячего черного щелока, температура в котле снижается, химические реакции прекращаются. Отобранный в бак-аккумулятор (поз. 9) горячий черный щелок хранится при температуре около 165 °С (если конечная температура варки составляла 170 °С). Белый щелок при наличии эффективного теплообмена можно нагреть до температуры 150 – 160 °С.

Благодаря этому после заливки щелоков в котле достигается высокая температура, и пар необходим только для нагревания содержимого котла до температуры варки.

Поскольку температура в выдувном резервуаре около 90 °С, выделение дурнопахнущих сернистых соединений сокращается по сравнению с обычной периодической варкой в десятки раз (табл. 2).

Таблица 2 – Выбросы сернистых соединений

Дурнопахнущий газ	Количество, кг/т в.с.целлюлозы	
	обычная периодическая варка	варка с вытеснением горячего черного щелока
Сероводород	0,04	0,00
Метилмеркаптан	0,90	0,00
Диметилсульфид	0,11	0,01
Диметилдисульфид	0,03	0,01
Всего	1,08	0,02

Применение теплоэкономичной технологии периодической сульфатной варки *SuperBatch* обеспечивает следующие преимущества в сравнении с обычной периодической варкой:

- 1) снижение расхода пара на варку (на 50 – 70 %);
- 2) увеличение прочности целлюлозы при более высоком выходе (на 1 – 2 %) за счет более равномерного провара;
- 3) возможность получения глубоко проваренной целлюлозы с числом Каппа 10...15;
- 4) улучшение отбора щелока и промывки целлюлозы;
- 5) значительное сокращение сернистых выбросов при разгрузке котла.

В настоящее время в мире успешно работают более 11 установок периодической варки по методу *SuperBatch*, причем используются варочные котлы большой емкости 200...400 м³.

При варке древесины хвойных пород в промышленных условиях с использованием теплоэкономичного метода возникли некоторые трудности. На трубках выпарной установки отмечалось отложение солей кальция. Оказалось, что основным источником кальция является хвойная древесина. При обычной периодической сульфатной варке концентрация кальция в щелоке увеличивается при нагревании, затем достигает максимума при температуре варки, после чего резко снижается.

Кальций входит в состав образующихся при варке комплексных соединений. При высокой их концентрации на горячих поверхностях (в теплообменниках, выпарных аппаратах) могут образоваться отложения. При варке *SuperBatch* щепы пропитывается теплым черным щелоком с температурой около 100 °С. Затем, после пропитки этот щелок идет на выпарку. Перед выпаркой щелок больше не подвергается тепловой обработке. Однако в пропиточном щелоке присутствуют комплексные соединения кальция, образовавшиеся при взаимодействии черного щелока с древесиной. Эти соединения неустойчивы и в трубках выпарных аппаратов разлагаются с образованием осадка карбоната кальция. Проведенные исследования позволили найти способ разрушения комплексных соединений кальция непосредственно в варочном котле.

2.3. Периодическая сульфатная варка по методу SuperBatch-K

С целью повышения конкурентоспособности метод *SuperBatch* был подвергнут дальнейшему совершенствованию; в результате появилась его модификация – метод *SuperBatch-K*, который лишен недостатка базовой технологии – отложения солей кальция в корпусах выпарной установки.

Новая технология варки *SuperBatch-K* (рис. 4) использует этот способ в варочном цикле.

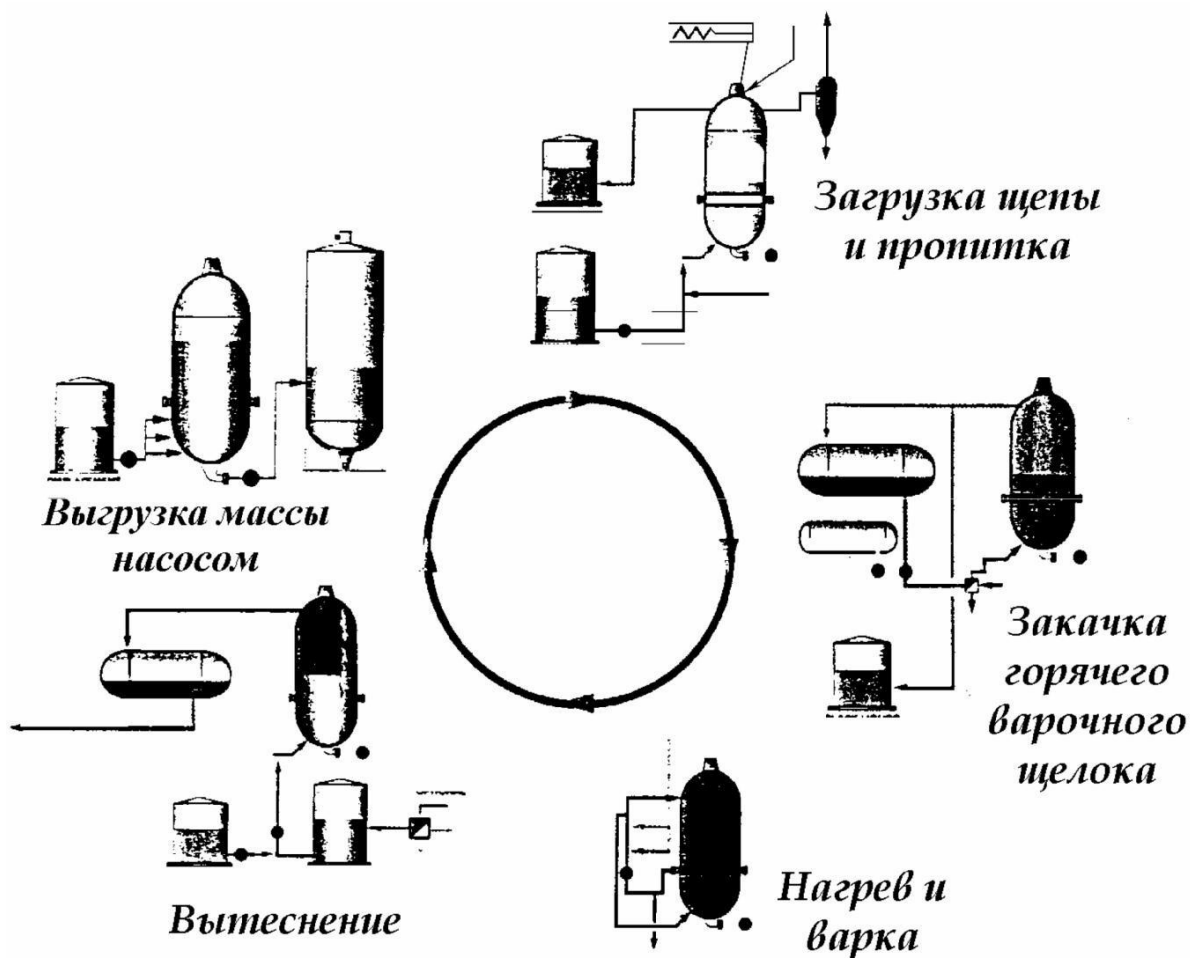


Рис. 4. Схема варочного процесса **SuperBatch-K**

В течение варочного цикла подача щелоков осуществляется в нижнюю часть котла, а отбор щелоков производится через сита в верхней его части.

Технология периодической варки **SuperBatch-K** включает в себя следующие ступени:

Комбинированное заполнение котла щепой и пропитка

Котел загружается щепой. Для обеспечения более плотной загрузки производится пропарка. Подача в котел пропиточного щелока начинается при подаче щепы. Для регулирования концентрации активной щелочи в пропиточном щелоке добавляется небольшое количество белого щелока. Заполнение идет до тех пор, пока котел не будет переполнен. Избыточный щелок возвращается в бак черного щелока (К-бак). Через вытеснительные

сита в верхней части котла вентиляторами удаляется выделившийся из щепы воздух. В конце ступени насосом для щелока в котле создается избыточное давление. Время заполнения котла по сравнению с процессом **SuperBatch** сокращается на 25 %.

Заполнение горячим щелоком

Горячий черный щелок закачивается в котел из бака-аккумулятора и вытесняет пропиточный щелок, содержащий комплексные соединения кальция, в К-бак. Часть вытесненного щелока, имеющая температуру выше 100 °С, поступает в бак-аккумулятор горячего черного щелока. Затем в котел подают горячий варочный щелок. Для этого горячий белый щелок из бака-аккумулятора белого щелока смешивается с горячим черным щелоком и поступает в котел. После закачки щелоков температура в котле составляет 150 – 160 °С. Обычно белый щелок подают в два этапа: большую часть — вместе с черным щелоком, оставшуюся часть — в течение нагрева и варки.

Нагрев

Нагрев до конечной температуры производится паром среднего давления, который подается прямо в трубу циркулирующего щелока. Варка идет по времени, часть горячего белого щелока поступает в котел во время варки. Вытесненный черный щелок отбирается в бак-аккумулятор горячего черного щелока.

Вытеснение

На вытеснение сначала подают щелок из К-бака. Таким образом высокая температура в котле используется для разрушения комплексных соединений кальция, перешедших в раствор при варке.

Окончательное вытеснение ведут фильтратом от промывной установки. Вытесненный горячий черный щелок идет на выпарку и на следующую варку. Количество вытесненного щелока соответствует объему фильтрата от промывной установки. В конце вытеснения температура массы ниже 90 °С.

Выгрузка

Масса выгружается насосом при низком давлении. При выгрузке масса разбавляется в нижней части котла черным щелоком, отобранным из котла в конце вытеснения. Температура при выгрузке должна быть ниже 100 °С. Это сохраняет прочность целлюлозы и предотвращает сернистые выбросы.

Система баков

В состав варочной установки входят два бака-аккумулятора (для черного и белого щелоков) под давлением, устройства для улавливания волокна из вытесненного щелока, пеносборник и бак черного щелока (К-бак).

Теплопередача

Горячий черный щелок, не используемый для последующих варок, охлаждается в теплообменнике белым щелоком и водой.

Затем черный щелок идет на фильтрацию от мелкого волокна, съём сырого сульфатного мыла и на выпарку. Отделенное волокно возвращается в варочный процесс. В случае варки хвойной древесины холодный черный щелок подается на выпарку, предварительно пройдя через ступень улавливания волокна на напорных фильтрах для щелока. При варке лиственной древесины для отделения волокна используются фильтры, работающие при атмосферном давлении.

Доводка температуры белого щелока до заданной производится непрерывно в теплообменнике с использованием пара высокого давления. В баке- аккумуляторе горячего черного щелока также есть циркуляция с подогревом щелока в теплообменнике. Постоянная циркуляция черного щелока улучшает отбор скипидара.

Эти же теплообменники используются и для подогрева щелоков, подаваемых на варку, при заливке варочного котла горячим черным щелоком. Система подачи горячего щелока, где поступающие в варочный котел щелока проходят всегда через подогреватель с паром, обеспечивает более равномерную

температуру щелоков, в результате чего получаемая целлюлоза имеет меньший разброс в числе Каппа.

Сдувки из варочных котлов идут через сборник горячего черного щелока, который через каплеотделитель соединен с системой поверхностных конденсаторов (с терпентинным конденсатором).

Удаление скипидара и неконденсируемых газов

Бак-аккумулятор горячего черного щелока соединен с системой поверхностных конденсаторов. Газы охлаждаются в две стадии (при варке хвойной древесины). Конденсат идет в декантатор скипидара, а скипидар — в бак скипидара и далее на очистку.

Загрязненный конденсат поступает в отгонную колонну. Неконденсируемые газы высокой концентрации (LVHC) направляются на сжигание. При варке лиственной древесины достаточно только охлаждения и очистки газов перед регенерацией.

Газы низкой концентрации из баков, работающих без давления, собираются, охлаждаются и так же, как и газы из варочных котлов, идут на дезодорацию.

Основные преимущества процесса ***SuperBatch-K*** перед ***SuperBatch***:

- 1) комбинированная подача щепы и пропиточного щелока сокращает загрузку и обеспечивает более равномерную варку;
- 2) в цикле варки снижается концентрация сухих веществ;
- 3) при варке разрушаются комплексные соединения кальция;
- 4) более эффективно происходит отделение мыла;
- 5) капитальные вложения снижаются за счет горизонтальной компоновки баков.

2.4. Периодическая сульфатная варка по методу **DuaLC**

Процесс **DuaLC** сочетает в себе двухступенчатую пропитку черным щелоком с тщательным контролем концентрации щелочи и температуры, что позволяет получать целлюлозу с высокими прочностными характеристиками. Метод периодической варки **DuaLC** используется для модернизации действующих варочных котлов, а также реализуется при создании новых предприятий.

Технология **DuaLC** включает следующие операции:

- 1) загрузка щепы и уплотнение щелоком при $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 2) заливка тёплого щелока и пропитка при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 3) заливка горячего варочного щелока при $t = 140\dots 150\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 4) нагрев до температуры варки;
- 5) варка;
- 6) двойное вытеснение черного щелока промывным фильтратом;
- 7) вымывка.

Оборот котла составляет 3...4 ч.

Данная технология объединяет в себе особенности способов **RDH** и **SuperBatch – K**.

Пропитка щепы осуществляется горячим черным щелоком. Используется двойное вытеснение черного щелока из целлюлозной массы, подаваемый на вытеснение промывной фильтрат вводится как в верхнюю, так и в нижнюю часть котла, в отличие от других методов, где используется традиционное вытеснение восходящим потоком. Испытание технологии двойного вытеснения производилось на предприятия Södra Mörrum. Благодаря двойному вытеснению, на котёл не ставятся верхние сита.

При модернизации традиционной периодической варки с переводом на технологию **DuaLC** достигаются следующие преимущества:

- снижение общего расхода пара на 50 %;

- равномерность процесса варки регулируется распределением щелочи в варочном котле;

- повышение выхода и качества целлюлозы;
- снижение выбросов в атмосферу;
- улучшение белимости целлюлозы.

Улучшение качества целлюлозы достигается благодаря следующим мерам:

- пропитка черным щелоком позволяет использовать его тепло, доставить сульфид внутрь щепы и тем самым обеспечить надлежащие условия растворения лигнина без заметного разрушения целлюлозы;

- поглощение сульфида щепой на стадии пропитки защищает целлюлозу от щелочной деструкции;

- отсутствует механическое повреждение волокна в процессе варки.

В целом современная технология периодической варки по достигаемым технико-экономическим показателям позволяет установкам периодической варки усиленно конкурировать с установками непрерывной варки целлюлозы разного назначения.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА

В данной главе представлен расчет периодической сульфатной варки с использованием тепла черного щелока на примере технологии **DualC**.

3.1. Укрупнённый баланс волокна по заводу, производящему хвойную белёную сульфатную целлюлозу

Исходные данные

$V_{\text{пот}}$ – безвозвратные потери волокна при промывке целлюлозы в соответствии с технологическими нормами Гипробума, $V_{\text{пот}} = 0,5 \%$;

$V_{\text{суч}}$ – сучки и непровар, отделяемые при грубом сортировании целлюлозы, $V_{\text{суч}} = 3 \%$;

$V_{\text{сг}}$ – потери при сгущении целлюлозы, $V_{\text{сг}} = 0,5 \%$;

$V_{\text{сорт}}$ – отходы от сортировок при тонком сортировании целлюлозы, $V_{\text{сорт}} = 2,2 \%$;

$V_{\text{ц}}$ – отходы при очистке целлюлозы на центриклинерах, $V_{\text{ц}} = 0,5 \%$;

$V_{\text{отб}}$ – химические потери волокна при отбелке целлюлозы на всех ступенях отбелки, $V_{\text{отб}} = 8 \%$;

$V_{\text{оп}}$ – безвозвратные потери волокна при очистке, сгущении белёной целлюлозы, $V_{\text{оп}} = 0,5 \%$.

Количество отсортированной, очищенной и сгущённой белёной целлюлозы $V = 880$ кг.

Количество белёной целлюлозы на сгущение после отбелки:

$$V_{\text{боч}} = \frac{V \times 100}{100 - V_{\text{оп}}} = \frac{880 \times 100}{100 - 0,5} = 884,4 \text{ кг.}$$

Количество небелёной целлюлозы на отбелку после сгущения:

$$V_{\text{от}} = \frac{V_{\text{боч}} \times 100}{100 - V_{\text{отб}}} = \frac{884,4 \times 100}{100 - 8} = 961,3 \text{ кг.}$$

Количество на сгущение после очистки и сортирования:

$$V_{\text{оч}} = \frac{V_{\text{от}} \times 100}{100 - V_{\text{оп}}} = \frac{961,3 \times 100}{100 - 0,5} = 966,1 \text{ кг.}$$

Количество отсортированной целлюлозы с учётом потерь на центрифугах:

$$V_{\text{с}} = \frac{V_{\text{оч}} \times 100}{100 - V_{\text{ц}}} = \frac{966,1 \times 100}{100 - 0,5} = 971,0 \text{ кг.}$$

Количество целлюлозы, направляемой на сортировки от сучколовителей с учётом отходов на сортировках:

$$V_{\text{ст}} = \frac{V_{\text{с}} \times 100}{100 - V_{\text{сорт}}} = \frac{971,0 \times 100}{100 - 2,2} = 992,8 \text{ кг.}$$

Количество целлюлозы, направляемой на сучколовители с учётом отходов на сучколовителях:

$$V_{\text{ст}} = \frac{V_{\text{с}} \times 100}{100 - V_{\text{суч}}} = \frac{992,8 \times 100}{100 - 3} = 1023,5 \text{ кг.}$$

Количество целлюлозы после варки перед промывкой с учётом потерь при промывке:

$$V_{\text{в}} = \frac{V_{\text{сч}} \times 100}{100 - V_{\text{пот}}} = \frac{1023,5 \times 100}{100 - 0,5} = 1028,6 \text{ кг.}$$

3.2. Древесно-подготовительный цех

3.2.1. Определение количества волокна для белёной целлюлозы по варке

Количество волокна для белёной целлюлозы по варке находится по формуле:

$$V_{\text{в}} = \frac{Ц \times \Sigma (\text{потерь и отходов, \%})}{100} + Ц, \text{ кг/т,}$$

где $V_{\text{в}}$ – волокно по варке целлюлозы, кг/т;

$Ц$ – содержание абсолютно-сухого волокна в 1 т воздушно-сухой целлюлозы при 12 % расчётной влажности ($Ц = 880 \text{ кг/т}$);

Σ (потерь и отходов, %) = 15,2 %;

$$B_B = \frac{880 \times 15,2}{100} + 880 = 1013,8 \text{ кг/т.}$$

3.2.2. Определение суточной производительности по варке целлюлозы

Определение суточной производительности белёной целлюлозы, $Q_{\text{сут}}$, т/сут, производится по формуле:

$$Q_{\text{сут}} = \frac{Q_{\text{год}}}{345} = \frac{170000}{345} = 492,8 \text{ т/сут,}$$

где $Q_{\text{год}}$ – годовая производительность белёной целлюлозы, кг/т;

345 – число рабочих дней в году.

Суточная производительность по варке находится по формуле:

$$Q_{\text{св}} = Q_{\text{сут}} \times \frac{B_B}{\text{Ц}} = 567,7 \text{ кг/т,}$$

где $Q_{\text{св}}$ – суточная производительность по варке, кг/т;

$Q_{\text{сут}}$ – суточная производительность белёной целлюлозы, кг/т;

B_B – волокно по варке целлюлозы, кг/т;

Ц – содержание абсолютно-сухого волокна в 1 т воздушно-сухой целлюлозы при 12 % расчётной целлюлозы (880 кг/т).

3.2.3. Определение расхода древесины

Расход древесины Д на варку 1 тонны целлюлозы находится по формуле:

$$D = \frac{\text{Ц} \times 100}{B}, \text{ кг/т,}$$

где B – выход целлюлозы из древесины, 47 %;

$$D = \frac{880 \times 100}{47} = 1872,3 \text{ кг/т.}$$

Объём древесины V_d , который необходим на варку 1 тонны целлюлозы, находится по формуле:

$$V_d = \frac{D}{\rho_d}, \text{ м}^3/\text{т},$$

где ρ_d – плотность сосны – 402 кг/м³;

$$V_d = \frac{1872,3}{402} = 4,7 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Объём щепы $V_{щ}$, который необходим на варку 1 тонны целлюлозы, находится по формуле:

$$V_{щ} = \frac{D}{q}, \text{ м}^3/\text{т},$$

где q – насыпная масса щепы, кг/м³:

$$q = \rho_d \times K = 402 \times 0,45 = 180,9 \text{ кг/м}^3;$$

K – коэффициент заполнения, равный 0,45;

$$V_{щ} = \frac{1872,3}{180,9} = 10,4 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Часовое потребление древесины на варку $V_ч$ находится по формуле:

$$V_ч = \frac{Q_{св}}{24} \times V_d = \frac{567,7}{24} \times 4,7 = 111,2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Определение часового расхода древесины на каждой ступени её переработки:

а) количество древесины V_p , поступающей на рубку в рубительную машину, находится по формуле:

$$V_p = V_ч + V_ч \times \frac{\Pi_1}{100}, \text{ м}^3/\text{ч};$$

где Π_1 – потери древесины при рубке и сортировании щепы, равные 2,5 %;

$$V_p = 111,2 + 111,2 \times \frac{2,5}{100} = 114,0 \text{ м}^3/\text{ч};$$

б) количество древесины V_B , поступившее на окорку в окорочный барабан, находится по формуле:

$$V_B = V_p + V_p \times \frac{\Pi_2}{100}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где Π_2 – потери древесины при окорке, равные 1,5 %;

$$V_B = 114 + 114 \times \frac{1,5}{100} = 115,7 \text{ м}^3/\text{ч};$$

в) количество древесины V_x , поступающее на хранение, находится по формуле:

$$V_x = V_B + V_B \times \frac{\Pi_3}{100}, \text{ м}^3/\text{ч};$$

где Π_3 – потери древесины при хранении, равные 1,3 %;

$$V_x = 115,7 + 115,7 \times \frac{1,3}{100} = 117,2 \text{ м}^3/\text{ч};$$

г) количество доставляемой древесины $V_{\text{дост}}$ находится по формуле:

$$V_{\text{дост}} = V_x + V_x \times \frac{\Pi_4}{100}, \text{ м}^3/\text{ч};$$

где Π_4 – потери древесины при поставке, равные 1 %;

$$V_{\text{дост}} = 117,2 + 117,2 \times \frac{1}{100} = 118,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3.2.4. Определение удельного расхода древесины

Удельный расход древесины $V_{\text{уд}}$ находится по формуле:

$$V_{\text{уд}} = \frac{V_{\text{дост}}}{Q_{\text{ч}}}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $Q_{\text{ч}}$ – часовая выработка целлюлозы при варке, т/ч;

$$Q_{\text{ч}} = \frac{Q_{\text{св}}}{24} = \frac{567,7}{24} = 23,7 \text{ т/ч};$$

$$V_{\text{уд}} = \frac{118,4}{23,7} = 5 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3.2.5. Определение количества утилизируемых отходов при переработке древесины в древесно-подготовительном цехе

Количество утилизируемых отходов при переработке древесины в древесно-подготовительном отделе $V_{ут}$ находится по формуле:

$$V_{ут} = V_{пот} + V_{кор}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $V_{пот}$ – общая часовая сумма потерь древесины, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$$\begin{aligned} V_{пот} &= V_{ч} \times \frac{\Pi_1}{100} + V_{р} \times \frac{\Pi_2}{100} + V_{б} \times \frac{\Pi_3}{100} + V_{х} \times \frac{\Pi_4}{100} = \\ &= 2,8 + 1,7 + 1,5 + 1,2 = 7,2 \text{ м}^3/\text{ч}; \end{aligned}$$

$V_{кор}$ – количество коры, $\text{м}^3/\text{ч}$:

$$V_{кор} = V_{дост} \times P_{к} = 118,4 \times 0,12 = 14,2 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $P_{к}$ – количество коры для сосны, $\text{м}^3/\text{м}^3$ древесины;

$$V_{ут} = 7,2 + 14,2 = 21,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

По результатам расчета древесно-подготовительного цеха получены технико-экономические показатели (табл. 3).

Таблица 3 – Технико-экономические показатели древесно-подготовительного цеха

Наименование расхода	Величина расхода
Расход древесины, $\text{м}^3/\text{т}$	4,7
Количество отходов древесины, $\text{м}^3/\text{ч}$	7,2
Количество коры, $\text{м}^3/\text{ч}$	0,6
Расход электроэнергии, $\text{кВт} \times \text{ч}/\text{т}$	37,0
Расход свежей воды, $\text{м}^3/\text{т}$	0,6

3.3. Варочный цех

Материальный и тепловой баланс периодической сульфатной варки с рекуперацией тепла черного щелока

Исходные данные для расчёта материального баланса:

Вид целлюлозы – целлюлоза сульфатная небелёная хвойная.

Степень делигнификации – 25-27 Каппа.

Порода древесины – сосна.

Объёмная условная плотность древесины (Z) – 402 кг/пл. м³.

Выход целлюлозы (B) – 47 %.

Влагосодержание щепы (W) – 45 %.

Расход активной щелочи на варку (ед. Na₂O) (A) – 18 % от абсолютно-сухой древесины.

Концентрация активной щелочи в белом щелоке (ед. Na₂O) (C_A) – 100 г/л.

Степень сульфидности белого щелока (C_y) – 30 %.

Степень каустизации белого щелока (K) – 80 %.

Степень восстановления белого щелока (B_c) – 94.

Объёмная плотность загрузки варочного котла (X) – 0,45.

Гидромодуль (ГМ) – 4,4:1.

Концентрация промывного черного щелока, подаваемого на вытеснение ($C_{п.ч.щ}$) – 12 %.

Плотность промывного черного щелока ($\rho_{ч.щ}$) – 1,060 т/м³.

Концентрация горячего черного щелока, возвращаемого из аккумулятора черного щелока ($C_{а.ч.щ}$) – 18,3 %,

Концентрация черного щелока, заливаемого на варку, сухих веществ ($C_{ч. щ}$) – 20 %.

Доля органической части в сухом остатке черного щелока (Org) – 70 %.

Доля минеральной части в сухом остатке черного щелока (M) – 30 %.

Температура варки ($t_{\text{кон}}$) – 170 °С.

Температура черного щелока на вытеснение и промывку в котле ($t_{\text{ч.щ.к}}$) – 80 °С.

Температура горячего черного щелока, вытесненного из котла ($t_{\text{в.ч.щ}}$) – 160 °С.

Температура черного щелока, заливаемого в котёл на пропитку ($t_{\text{ч.щ}}$) – 140 °С.

Температура горячего белого щелока, заливаемого в котёл ($t_{\text{г.б.щ}}$) – 130 °С.

Температура белого щелока, поступающего из отдела каустизации ($t_{\text{б.щ}}$) – 80 °С.

Температура щепы ($t_z, t_{\text{л}}$):

летом – 25 °С;

зимой – 5 °С;

Объём варочного котла ($V_{\text{к}}$) – 110 м³;

Производительность варочного цеха (Q) – 568 т воздушно-сухой целлюлозы/сут.

В табл. 4 представлено распределение времени по операциям в обороте котла традиционной периодической сульфатной варки и периодической сульфатной варки с рекуперацией тепла черного щелока.

Выход древесного остатка составит:

после заварки – 62 %;

после варки – 48 %;

после вытеснения – 47 %.

Расчёт по варке ведётся на 1 т воздушно-сухой целлюлозы.

Таблица 4 – Распределение времени по операциям в обороте котла

	Традиционная периодическая сульфатная варка	Периодическая сульфатная варка с рекуперацией тепла черного щелока
Осмотр	10 мин	5 мин
Загрузка щепой с уплотнением пропаркой	40 мин	20 мин
Заливка горячего черного щелока	10 мин	10 мин
Заливка горячего белого щелока	10 мин	10 мин
Пропитка черным щелоком	-	25 мин
Подъем до температуры варки, «Заварка»	70 мин	20 мин
Стоянка при конечной температуре варки, «Варка»	100 мин	80 мин
Вытеснение	-	20 мин
Разгрузка	20 мин	15 мин
Резерв	-	5 мин
Итого	260 мин (4 ч 20 мин)	210 мин (3 ч 30 мин)

3.3.1. Загрузка щепы, заливка щелоков и пропитка

Количество абсолютно-сухой щепы, загружаемой в котёл на варку для получения 1 т воздушно-сухой целлюлозы (на 880 кг абсолютно-сухой целлюлозы) (D – количество древесины, D_1 – количество древесины на 1 м³ котла, D_2 – количество древесины на одну котловарку):

$$D = \frac{880 \times 100}{B} = \frac{880 \times 100}{47} = 1872,3 \text{ кг на 1 т в.с. целлюлозы;}$$

$$D_1 = Z \times W = 402 \times 0,45 = 180,9 \text{ кг на 1 м}^3 \text{ котла;}$$

$$D_2 = D_1 \times V_k = 180,9 \times 110 = 19899 \text{ кг на котловарку.}$$

Количество воды, поступающей на варку со щепой (V_1) и на одну котловарку (V_2), при заданной влажности щепы (W):

$$V_1 = \frac{D \times W}{100 - W} = \frac{1872,3 \times 45}{100 - 45} = 1531,2 \text{ л на 1 т в.с.щ};$$

$$V_2 = \frac{D_2 \times W}{100 - W} = \frac{19899 \times 45}{100 - 45} = 16281,0 \text{ л на одну котловарку.}$$

Количество абсолютно-сухой целлюлозы ($B_{ц}$) и воздушно-сухой целлюлозы (B_c), получаемой после варки за одну котловарку:

$$B_{ц} = D_2 \times B = 19899 \times 0,47 = 9352,5 \text{ кг а.с.целлюлозы};$$

$$B_c = \frac{B_{ц}}{0,88} = \frac{9352,5}{0,88} = 10627,9 \text{ кг в.с.целлюлозы}$$

Количество пара (Q_3, Q_l), подаваемого на уплотнение и пропарку зимой и летом:

$$Q_3 = \frac{(D \times c_{щ} + D \times c_{в}) \times (t_{щ.з} + t_{конд}) + h_{л} \times V_1}{h_{п} - h_{конд}};$$

$$Q_l = \frac{(D \times c_{щ} + D \times c_{в}) \times (t_{щ.з} + t_{конд})}{h_{п} - h_{конд}},$$

где $h_{п}$ – теплосодержание пара при избыточном давлении 0,3 МПа, кДж/кг;

$h_{конд}$ – теплосодержание конденсата при 90 °С ($t_{конд}$), кДж/кг;

$h_{л}$ – удельная теплота плавления льда, кДж/кг;

$c_{в}$ – теплоёмкость воды, кДж/(кг · °С);

$c_{щ}$ – теплоёмкость щепы, кДж/(кг · °С).

$$Q_3 = \frac{(1872,3 \times 1,34 + 1872,3 \times 4,19) \times (5 + 90) + 334 \times 1531,2}{2740 - 377} = 632,7 \text{ кг};$$

$$Q_l = \frac{(1872,3 \times 1,34 + 1872,3 \times 4,19) \times (90 + 5)}{2740 - 377} = 284,8 \text{ кг.}$$

Количество пара ($Q_{3.к}, Q_{л.к}$), который конденсирует в котле, принимаем равный 90 % от его количества:

$$Q_{з.к} = Q_з \times 0,9 = 632,7 \times 0,9 = 569,4 \text{ кг};$$

$$Q_{л.к} = Q_л \times 0,9 = 284,8 \times 0,9 = 256,3 \text{ кг}.$$

Количество пара ($Q_{з.в}$, $Q_{л.в}$), выходящего из котла с воздухом при загрузке:

$$Q_{з.в} = Q_з - Q_{з.к} = 632,7 - 569,4 = 63,3 \text{ кг};$$

$$Q_{л.в} = Q_л - Q_{л.к} = 284,8 - 256,3 = 28,5 \text{ кг}.$$

Общее количество жидкости в котле при варке (V) при заданном гидромодуле (ГМ):

$$V = Д \times ГМ = 1872,3 \times 4,4 = 8238,1 \text{ л}.$$

Количество черного щелока ($Щ_з$, $Щ_л$), подаваемого в котёл на пропитку:

$$Щ_з = V - Q_{з.к} - V_1 = 8238,1 - 569,4 - 1531,2 = 6137,5 \text{ кг};$$

$$Щ_л = V - Q_{л.к} - V_1 = 8238,1 - 256,3 - 1531,2 = 6450,6 \text{ кг}.$$

Из-за того, что в зимний период времени расход пара выше, следующие расчёты ведутся именно для этого периода времени.

Масса жидкости ($V_з$) в котле в зимний период времени:

$$V_з = Щ_з + Q_{з.к} + V_1 = 6137,5 + 569,4 + 1531,2 = 8238,1 \text{ кг (дм}^3\text{)}.$$

Количество сухих веществ в черном щелоке, который поступает в котёл (Φ_1) при заданной концентрации в черном щелоке:

$$\Phi_1 = Щ_з \times C_{ч.щ} = 6137,5 \times 0,2 = 1227,5 \text{ кг},$$

в том числе органических $\Phi_2 = \Phi_1 \times \text{Орг} = 1227,5 \times 0,7 = 859,3 \text{ кг}$,

минеральных $\Phi_3 = \Phi_1 \times M = 1227,5 \times 0,3 = 368,2 \text{ кг}$.

Количество органических веществ древесины ($\Phi_{о.д.}$), растворяющихся в период пропитки, составляет 5 % от а.с. древесины:

$$\Phi_{о.д.} = Д \times 0,05 = 1872,3 \times 0,05 = 93,6 \text{ кг}.$$

Остаётся древесины $Д_0 = Д - \Phi_{о.д.} = 1872,3 - 93,6 = 1778,7 \text{ кг}$.

Количество растворённых органических веществ ($\Phi_{о.в.}$) в щелоке в конце пропитки:

$$\Phi_{о.в.} = \Phi_2 + \Phi_{о.д.} = 859,3 + 93,6 = 952,9 \text{ кг}.$$

Концентрация растворённых веществ ($C_{p.в}$) в конце пропитки:

$$C_{p.в} = \frac{\Phi_{o.в} + \Phi_3}{V_3 + \Phi_{o.в} + \Phi_3} = \frac{952,9 + 368,2}{8238,1 + 952,9 + 368,2} = 13,8 \%$$

Полученные результаты представлены в табл.5,6,6.1.

Таблица 5 – Материальный баланс операции «Пропитка»

Вещества	Со щепой	С конденсатом	С черным щелоком	Переходит в раствор	Итого в котле
Вода, л (кг)	1531,2	569,4	6137,5	-	8238,1
Органические вещества, кг:					
древесина	1872,3	-	-	93,6	1778,7
растворённые в черном щелоке	-	-	859,3	*→	952,9*
Минеральные вещества, кг	-	-	368,2	-	368,2
Всего	3403,5	569,4	7365,0	93,6	11337,9

* - переходит в черный щелок в составе растворённых органических веществ и учитывается там, т. е. не выводится из системы.

Таблица 6 – Тепловой баланс операции «Пропитка»

Источник теплоты	Расчётные данные (приход)	Количество теплоты, кДж
Щепа ($T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$D \times c_{щ} \times T = 1872,3 \times 1,34 \times 90$	225799,4
Вода в щепе и конденсат	$(V_1 + Q_{з.к}) \times c_{в.} \times t_{конд} = (1531,2 + 569,4) \times 4,19 \times 90$	792136,3
Вода с черным щелоком	$Щ_3 \times c_{в.} \times t_{ч.щ} = 6137,5 \times 4,19 \times 140$	3600257,5
Органические вещества черного щелока	$\Phi_2 \times c_{щ} \times t_{ч.щ} = 859,3 \times 1,34 \times 140$	161204,7
Минеральные вещества черного щелока	$\Phi_3 \times 1,13 \times t_{ч.щ} = 368,2 \times 1,13 \times 140$	58249,2
Итого	-	4837647,1

Таблица 6.1 – Тепловой баланс на конец операции «Пропитка»

Источник теплоты	Расчётные данные (приход)	Количество теплоты, кДж
Щепа ($T_{\text{п}}$)	$D_0 \times 1,34 \times T_{\text{п}} = 1778,7 \times 1,34 \times T_{\text{п}}$	$2383,5 \times T_{\text{п}}$
Вода ($T_{\text{п}}$)	$V \times 4,19 \times T_{\text{п}} = 8238,1 \times 4,19 \times T_{\text{п}}$	$34517,6 \times T_{\text{п}}$
Растворённые органические вещества	$\Phi_{\text{о.в}} \times 1,34 \times T_{\text{п}} = 952,9 \times 1,34 \times T_{\text{п}}$	$1276,9 \times T_{\text{п}}$
Растворённые минеральные вещества	$\Phi_3 \times 1,13 \times T_{\text{п}} = 368,2 \times 1,13 \times T_{\text{п}}$	$416,1 \times T_{\text{п}}$
Итого	-	$38594,1 \times T_{\text{п}}$

Температура в котле после пропитки:

$$T_{\text{п}} = \frac{4837467,1}{38594,1} = 125 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3.3.2. Заливка горячего белого щелока

Расчёт состава белого щелока по его характеристикам в единицах Na_2O :

$$C_{\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{O}} = \frac{C_A \times (100 - C_y)}{100} = \frac{100 \times (100 - 30)}{100} = 70 \text{ г/л в е.д. Na}_2\text{O};$$

$$C_{\text{Na}_2\text{S}/\text{Na}_2\text{O}} = \frac{C_A \times C_y}{100} = \frac{100 \times 30}{100} = 30 \text{ г/л в е.д. Na}_2\text{O};$$

$$C_{\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{O}} = C_{\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{O}} \times \frac{C_A - K}{K} = 70 \times \frac{100 - 80}{80} = 17,5 \text{ г/л в е.д. Na}_2\text{O};$$

$$C_{\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{Na}_2\text{O}} = C_{\text{Na}_2\text{S}/\text{Na}_2\text{O}} \times \frac{C_A - B_c}{100} = 30 \times \frac{100 - 94}{94} = 1,9 \text{ г/л в е.д. Na}_2\text{O}.$$

Концентрация всей щелочи в ед. Na_2O :

$$\begin{aligned} C_{\text{общ. Na}_2\text{O}} &= C_{\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{O}} + C_{\text{Na}_2\text{S}/\text{Na}_2\text{O}} + C_{\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{O}} + C_{\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{Na}_2\text{O}} = \\ &= 70 + 30 + 17,5 + 1,9 = 119,4 \text{ г/л в е.д. Na}_2\text{O}. \end{aligned}$$

Состав белого щелока в собственных единицах:

$$C_{\text{NaOH}/\text{с.е}} = C_{\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{O}} \times \frac{\text{экв. м. NaOH}}{\text{экв. м. Na}_2\text{O}} = 70 \times \frac{40}{30} = 93,3 \text{ г/л NaOH};$$

$$C_{\text{Na}_2\text{S}/\text{с.е}} = C_{\text{Na}_2\text{S}/\text{Na}_2\text{O}} \times \frac{\text{экв. м. Na}_2\text{S}}{\text{экв. м. Na}_2\text{O}} = 30 \times \frac{39}{31} = 37,7 \text{ г/л Na}_2\text{S};$$

$$C_{\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{с.е}} = C_{\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{O}} \times \frac{\text{экв. м. Na}_2\text{CO}_3}{\text{экв. м. Na}_2\text{O}} = 17,5 \times \frac{53}{51} = 18,2 \text{ г/л Na}_2\text{CO}_3;$$

$$C_{\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{с.е}} = C_{\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{Na}_2\text{O}} \times \frac{\text{экв. м. Na}_2\text{SO}_4}{\text{экв. м. Na}_2\text{O}} = 1,9 \times \frac{71}{31} = 4,4 \text{ г/л Na}_2\text{SO}_3.$$

Концентрация всей щелочи в собственных единицах:

$$C_{\text{общ. с.е}} = C_{\text{NaOH}/\text{с.е}} + C_{\text{Na}_2\text{S}/\text{с.е}} + C_{\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{с.е}} + C_{\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{с.е}} = \\ = 93,3 + 37,7 + 18,2 + 4,4 = 153,6 \text{ г/л в собственных единицах.}$$

Степень активности белого щелока ($A_{\text{акт}}$):

$$A_{\text{акт}} = \frac{C_A}{C_{\text{общ. Na}_2\text{O}}} = \frac{100}{119,4} = 0,84.$$

Коэффициент пересчёта (E) натриевых соединений белого щелока из единиц Na_2O в собственные единицы:

$$E = \frac{C_{\text{общ. с.е}}}{C_{\text{общ. Na}_2\text{O}}} = \frac{153,6}{119,4} = 1,3.$$

Количество активной щелочи ($M_{\text{Na}_2\text{O}}$), которое поступает с белым щелоком на варку, в ед. Na_2O :

$$M_{\text{Na}_2\text{O}} = D \times A = 1872,3 \times 0,18 = 337,0 \text{ кг в ед. Na}_2\text{O}.$$

Количество активной щелочи ($M_{\text{с.е}}$), которое поступает с белым щелоком на варку, в собственных единицах:

$$M_{\text{с.е}} = M_{\text{Na}_2\text{O}} \times E = 337,0 \times 1,3 = 438,1 \text{ кг в собственных единицах.}$$

Количество «всей щелочи» в собственных единицах, поступающей в котёл с белым щелоком (M_1):

$$M_1 = \frac{M_{\text{с.е}}}{A_{\text{акт}}} = \frac{438,1}{0,84} = 521,6 \text{ кг в собственных единицах}$$

Объём белого щелока, который подаётся на варку, при заданной концентрации:

$$V_{\text{б.щ}} = \frac{M_{\text{Na}_2\text{O}} \times 1000}{100} = \frac{337,0 \times 1000}{100} = 3370,0 \text{ л.}$$

При закачке белого щелока в котёл отбирают через верхнее циркуляционное сито 3370 л щелока.

С отобранным из котла черным щелоком уходит сухих веществ с концентрацией 13,8 %:

$$\Phi_{\text{с.в}} = V_{\text{б.щ}} \times 0,138 = 3370 \times 0,138 = 465,1 \text{ кг,}$$

в том числе органических $\Phi_{\text{с.о.в}} = \Phi_{\text{с.в}} \times \text{Орг} = 465,1 \times 0,7 = 325,6 \text{ кг;}$

минеральных $\Phi_{\text{с.м.в}} = \Phi_{\text{с.в}} \times \text{М} = 465,1 \times 0,3 = 139,5 \text{ кг.}$

Количество черного щелока после заливки белого щелока и вытеснения части черного щелока:

$$S = V - V_{\text{б.щ}} = 8238,1 - 3370,0 = 4868,1 \text{ кг.}$$

В нём содержится сухих веществ:

$$S_{\text{с.в}} = (\Phi_{\text{о.в}} + \Phi_3) - \Phi_{\text{с.в}} = (952,9 + 368,2) - 465,1 = 856 \text{ кг,}$$

в том числе органических $S_{\text{с.о.в}} = \Phi_{\text{о.в}} - \Phi_{\text{с.о.в}} = 952,9 - 325,6 = 627,3 \text{ кг;}$

минеральных $S_{\text{с.м.в}} = \Phi_{\text{с.о.в}} - \Phi_{\text{с.м.в}} = 368,2 - 139,5 = 228,7 \text{ кг.}$

Содержание минеральных веществ после заливки белого щелока в котёл увеличится на 521,6 кг:

$$\Phi_0 = 228,7 + 521,6 = 750,3 \text{ кг}$$

Полученные результаты представлены в табл.7,8,8.1,8.2.

Таблица 7 – Материальный баланс операции «Заливка горячего белого щелока»

Вещества	Перед заливкой горячего белого щелока	Уходит с вытесненным черным щелоком	Приходит с горячим белым щелоком	Осталось в котле после заливки горячего белого щелока
Вода	8238,1	3370	3370	8238,1
Органические вещества, кг				
Древесина	1778,7	-	-	1778,7
Растворённые органические вещества	952,9	325,6	-	627,3
Минеральные вещества, кг				
Растворённые в черном щелоке	368,2	139,5	-	228,7
Растворённые в белом щелоке	-	-	521,6	521,6
Итого	11337,9	3835,1	3891,6	11394,4

Таблица 8 – Тепловой баланс операции «Заливка горячего белого щелока»

Источник тепла	Расчётные данные (приход)	Количество теплоты, кДж
Щепа ($T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$D_0 \times c_{щ} \times T =$ $= 1778,7 \times 1,34 \times 125$	297932,3
Вода с черным щелоком ($T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$V \times c_в \times T =$ $= 8238,1 \times 4,19 \times 125$	4314704,9
Органические вещества черного щелока ($T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$\Phi_{о.в} \times c_{щ} \times T =$ $= 952,9 \times 1,34 \times 125$	159610,8
Минеральные вещества черного щелока ($T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$\Phi_3 \times 1,13 \times T =$ $= 368,2 \times 1,13 \times 125$	52008,3
Вода с горячим белым щелоком ($T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$V_{б.щ} \times c_в \times T =$ $= 3370 \times 4,19 \times 130$	1835639,0
Минеральные вещества с горячим белым щелоком ($T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$M_1 \times 1,13 \times T =$ $= 521,6 \times 1,13 \times 130$	76623,0
Итого	-	6736518,3

Таблица 8.1 – Тепловой баланс вытесненного черного щелока

Источник тепла	Расчётные данные (приход)	Количество теплоты, кДж
Вода в вытесненном черном щелоке ($T=130\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$V_{\text{б.щ}} \times c_{\text{в}} \times T =$ $= 3370 \times 4,19 \times 130$	18353639,0
Органические вещества, вытесненного черного щелока ($T=130\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$\Phi_{\text{с.о.в}} \times c_{\text{щ}} \times T =$ $= 325,6 \times 1,34 \times 130$	18353639,0
Минеральные вещества, вытесненного черного щелока ($T=130\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$\Phi_{\text{с.м.в}} \times 1,13 \times T =$ $= 139,5 \times 1,13 \times 130$	20492,6
Итого	-	18430851,1

Таблица 8.2 – Тепловой баланс операции «Заливка горячего белого щелока» после заливки белого щелока

Источник тепла	Расчётные данные (после заливки горячего белого щелока в котёл)	Количество теплоты, кДж
Щепа (T_3)	$D_0 \times 1,3 \times T_3 =$ $= 1778,7 \times 1,3 \times T_3$	$2312,3 \times T_3$
Вода (T_3)	$V \times c_{\text{в}} \times T_3 =$ $= 8238,1 \times 4,19 \times T_3$	$34517,6 \times T_3$
Растворённые органические вещества (T_3)	$S_{\text{с.о.в}} \times c_{\text{щ}} \times T_3 =$ $= 627,3 \times 1,34 \times T_3$	$840,6 \times T_3$
Растворённые минеральные вещества (T_3)	$(S_{\text{с.м.в}} + M_1) \times 1,13 \times T_3 =$ $= (228,7 + 521,6) \times 1,13 \times T_3$	$847,8 \times T_3$
Итого	-	$38518,3 \times T_3$

Температура в котле после заливки белого щелока:

$$T_3 = \frac{6736518,3 - 18430851,1}{38518,3} = 127\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

3.3.3. Заварка

Во время терпентинной сдувки выделяется 90 кг пара на 1 т абсолютно сухой древесины. Следовательно, в нашем случае выделится (P_1) кг пара:

$$P_1 = 90 \times \frac{D_0}{1000} = 90 \times \frac{1778,7}{1000} = 160,1 \text{ кг.}$$

При сдувке происходит также переброс щелока, т.е. унос его с паром в капельно-жидкой форме. Примем, что переброс щелока при терпентинной сдувке составляет 1 % от начального объема жидкости V в котле (P_2):

$$P_2 = V \times 0,01 = 8238,1 \times 0,01 = 82,4 \text{ кг (л).}$$

В результате испарения (P_1) и переброса щелока (P_2) при терпентинной сдувке количество жидкости в котле к концу заварки составит (V_4):

$$V_4 = V - (P_1 + P_2) = 8238,1 - (160,1 + 82,4) = 7995,6 \text{ кг (л).}$$

Среднеарифметическое количество жидкости во время заварки (V_5):

$$V_5 = \frac{V + V_4}{2} = \frac{8238,1 + 7995,6}{2} = 8116,9 \text{ л (кг).}$$

Выход к концу заварки составляет 62 %. К концу заварки растворяется 38 % органических веществ древесины:

$$S_1 = D \times 0,38 = 1872,3 \times 0,38 = 711,5 \text{ кг.}$$

Во время пропитки растворилось 93,6 кг органических веществ. Получается, при заварке перешло в раствор веществ:

$$S_3 = S_1 - 93,6 = 711,5 - 93,6 = 617,9 \text{ кг.}$$

Во время сдувки из котла при варке сосны уходит 20 кг летучих веществ:

скипидар – 11 кг;

метанол – 5 кг;

метилмеркаптан – 1 кг;

диметилсульфид – 3 кг.

С учётом 20 кг летучих продуктов, уходящих при терпентинной сдвукке во время варки хвойной древесины, в раствор перейдёт (S_2) органических веществ:

$$S_2 = S_3 - 20 = 617,9 - 20 = 597,9 \text{ кг органических веществ.}$$

Вместе с органическими веществами черного щелока, закачанного в котёл, к концу заварки в растворе будет органических веществ (S_3):

$$S_3 = S_3 + S_2 = 617,9 + 597,9 = 1215,8 \text{ кг органических веществ.}$$

Среднеарифметическое количество органических веществ, находящихся в растворе в период заварки (S_4):

$$S_4 = \frac{S_2 + S_3}{2} = \frac{617,9 + 1215,8}{2} = 916,9 \text{ кг органических веществ.}$$

Средняя концентрация растворённых органических веществ во время заварки (O_1):

$$O_1 = \frac{S_4 \times 1000}{V_5} = \frac{916,9 \times 1000}{8116,9} = 113,0 \text{ г/л} = 0,113 \text{ кг/л.}$$

Средняя концентрация минеральных веществ во время заварки ($C_{\text{мин.1}}$):

$$C_{\text{мин.1}} = \frac{S_{\text{с.м.в}} + M_1}{V_5} \times 1000 = \frac{228,7 + 521,6}{8116,7} \times 1000 = 92,4 \text{ г/л} = 0,0924 \text{ кг/л.}$$

Уходит органических веществ с перебросом щелока (S_5):

$$S_5 = O_1 \times P_2 = 0,113 \times 82,4 = 9,3 \text{ кг.}$$

Уходит минеральных веществ с перебросом щелока (M_4):

$$M_4 = C_{\text{мин.1}} \times P_2 = 0,0924 \times 82,4 = 7,6 \text{ кг.}$$

Остаётся в котле к концу заварки твёрдого вещества древесины (D_1):

$$D_1 = D - \Phi_{\text{о.д.}} - S_3 = 1872,3 - 93,6 - 617,9 = 1160,8 \text{ кг.}$$

Остаётся минеральных веществ в черном щелоке (M_5):

$$M_5 = (S_{\text{с.м.в}} + M_1) - M_4 = (228,7 + 521,6) - 7,6 = 742,7 \text{ кг.}$$

Полученные результаты представлены в табл.9.

Таблица 9 – Материальный баланс операции «Заварка»

Вещества	Перед началом заварки	По окончании сдувки			Осталось в котле после заварки	
		уходит при сдувке		переходит в раствор		
		в виде паров	с перебросом			
Вода, л (кг)	8238,1	160,1	82,4	-	242,5	7995,6
Органические вещества, кг						
Древесина	1778,7	-	-	597,9*	-	1160,8
Растворённые в щелоке	627,3	-	9,3	*→	9,3	1215,8*
				↓		
Летучие вещества	-	20	-	-	20	-
Минеральные вещества, кг	750,3	-	7,6	-	7,6	742,7
Итого	11394,4	180,1	99,3	597,9*	279,4	11115,0

* – переходит в черный щелок в состав органических веществ и учитывается там, т.е. из системы не выводится. Соответственно, баланс системы: $\sum \text{гр.}(7 + 6) = 11115,0 + 279,4 = 11394,4 \text{ кг} = (\text{гр.}2)$.

3.3.4. Варка

В период стоянки на конечной температуре после заварки происходит дальнейшее растворение древесины, и выход снижается с 62 % до 48 %, т.е. растворяется 14 % древесины.

В период варки в раствор переходит органических веществ древесины (S_7):

$$S_7 = D \times 0,14 = 1872,3 \times 0,14 = 262,1 \text{ кг.}$$

После операции «Варка» в котле находится древесного остатка (целлюлозы):

$$D_2 = D_1 - S_7 = 1160,8 - 262,1 = 898,7 \text{ кг древесного вещества.}$$

В черном щелоке после операции «Варка» суммарно находится растворённых органических веществ (S_8):

$$S_8 = S_6 + S_7 = 1215,9 + 262,1 = 1478,0 \text{ кг.}$$

В черном щелоке после стадии «Варка» находится сухих веществ:

$$S_9 = S_8 + M_5 = 1478,0 + 742,7 = 2220,7 \text{ кг.}$$

Концентрация сухих веществ черного щелока:

$$C_{\text{с.в.ч.щ}} = \frac{S_9}{11115,0} \times 100 = \frac{2220,7}{11115,0} \times 100 = 20 \text{ \%}.$$

Плотность черного щелока составляет 1108 кг/м^3 .

Полученные результаты представлены в табл. 10.

Таблица 10 – Материальный баланс операции «Варка»

Вещества	Осталось в котле после заварки	Переходит в черный щелок	В котле после варки
Вода, л (кг)	7995,6	-	7995,6
Органические вещества, кг:			
Целлюлоза	1160,8	262,1	898,7
Растворённые в черном щелоке	1215,8	*→	1478,0
Минеральные вещества, кг	742,7	-	742,7
Итого	11115,0	-	11115,0

* – переходит в черный щелок в состав органических веществ и учитывается там, т.е. из системы не выводится.

В операциях «Заварка» и «Варка» требуется свежий пар для нагрева содержимого котла до конечной температуры варки.

Для расчёта теплового баланса возьмём ниже перечисленные дополнительные исходные данные:

- теплоёмкость кожуха котла (теплоёмкость стали) – $0,5 \text{ кДж/(кг} \times \text{°C)}$;
- начальная температура кожуха котла и изоляционного слоя – 100 °C ;
- масса котла - 43000 кг ;
- масса изоляционного слоя – 5800 кг ;

- теплоёмкость изоляционного слоя – 0,92 кДж/(кг × °С);
- коэффициент теплоотдачи через стенку – 12 кДж/(кг × °С);
- наружная поверхность котла – 132 м².

Потери тепла с терпентинной сдувкой

$$Q_{\text{пот}} = 2130 \times 160,1 + 287 \times 20 = 346631 \text{ кДж},$$

где 2130 кДж/кг – теплота испарения водяных паров при средней температуре сдувки 145 °С;

287 кДж/кг – теплота парообразования скипидара;

160,1 кг – количество водяных паров, уходящих во время сдувки;

20 кг – количество летучих веществ, уходящих при сдувке.

Нагрев кожуха котла

$$Q_{\text{к}} = \frac{43000 \times 0,5 (170 - 100)}{10,6279} = 141608,4 \text{ кДж}$$

где 10,6279 т в.с. целлюлозы, полученной за одну котловарку.

Нагрев теплоизоляционного слоя

$$Q_{\text{т.с}} = \frac{5800 \times 0,92 (120 - 100)}{10,6279} = 10041,5 \text{ кДж},$$

где 120 °С – средняя температура изоляционного слоя в конце варки;

100 °С – средняя температура изоляционного слоя в начале варки.

Потери с теплоотдачей

$$Q_{\text{т.}} = \frac{12 \times 132 \times (148,5 - 20) \times 0,3 + (170 - 20) \times 1,3}{10,6279} = 5763,9 \text{ кДж},$$

где 12 – коэффициент теплоотдачи через теплоизоляционную стенку котла;

148,5 °С – средняя температура при заварке;

20 °С – температура воздуха в помещении;

0,3 – продолжительность заварки;

1,3 – продолжительность варки.

Полученные результаты представлены в табл. 11, 11.1.

Таблица 11 – Тепловой баланс операций «Заварка»

Источник тепла	Расчётные данные (приход)	Количество теплоты, кДж
Целлюлоза (Т = 127 °С)	$D_0 \times c_{щ} \times T =$ $= 1778,7 \times 1,34 \times 127$	302699,2
Вода (Т = 127 °С)	$V \times c_{в} \times T =$ $= 8238,1 \times 4,19 \times 127$	4383740,2
Растворённые органические вещества (Т = 127 °С)	$S_{с.о.в} \times c_{щ} \times T =$ $= 627,3 \times 1,34 \times 127$	106753,9
Растворённые минеральные вещества (Т = 127 °С)	$\Phi_0 \times 1,13 \times T =$ $= 750,3 \times 1,13 \times 127$	107675,6
Приход тепла от экзотермических реакций	$19000 \times 0,012 \times D =$ $= 19000 \times 0,012 \times 1872,3$	426884,4
Итого		5327753,3

Таблица 11.1 – Тепловой баланс операций «Варка»

Источник тепла	Расчётные данные (приход)	Количество теплоты, кДж
Целлюлоза (Т = 170 °С)	$D_2 \times c_{щ} \times T =$ $= 898,7 \times 1,34 \times 170$	204723,9
Вода (Т = 170 °С)	$V_4 \times c_{в} \times T =$ $= 7995,6 \times 4,19 \times 170$	5695265,9
Растворённые органические вещества (Т = 170 °С)	$S_8 \times c_{щ} \times T =$ $= 1478,0 \times 1,34 \times 170$	336688,4
Растворённые минеральные вещества (Т = 170 °С)	$M_5 \times 1,13 \times T =$ $= 742,7 \times 1,13 \times 170$	142672,7
Потери с терпентинной сдувкой	-	346631,0
Нагрев кожуха котла	-	141608,4
Нагрев теплоизоляционного слоя	-	10041,5
Потери с теплоотдачей		5763,9
Итого		6883395,7

Разность между расходом и приходом тепла

$$6883395,7 - 5327753,3 = 1555642,4 \text{ кДж.}$$

Количество пара, которое необходимо для нагрева содержимого котла до температуры варки:

$$\frac{1555642,4}{2785 - 180 \times 4,19} = 766,0 \text{ кг,}$$

где 2785 кДж/кг – теплосодержание пара давлением 1,1 МПа;

180 °С – температура конденсата, удалённого из подогревателя.

Примем потери в паропроводах 5 %.

Удельный расход пара

$$766,0 \times 1,05 = 804,3 \text{ кг/т.}$$

3.3.5. Вытеснение

Выход целлюлозы на данной операции снижается с 48 % до 47 %.

Растворяется органических веществ:

$$S = D \times 0,01 = 1872,3 \times 0,01 = 18,7 \text{ кг.}$$

В конце операции «Вытеснение» остаётся целлюлозы в котле:

$$D_3 = D_2 - S = 898,7 - 18,7 = 880,0 \text{ кг/т.}$$

В конце данной операции в черном щелоке находится:

$$S_{10} = S_8 + S = 1478,0 + 18,7 = 1496,7 \text{ кг.}$$

Масса щелока в конце операции:

$$M_{\text{щ.в}} = V_4 + S_{10} + M_5 = 7995,6 + 1496,7 + 742,7 = 10235,0 \text{ кг.}$$

или в расчёте на одну котловарку

$$10235,0 \times 10,6279 = 108776,6 \text{ кг.}$$

В начале операции «Вытеснение» в котле присутствуют:

10627,9 кг целлюлозы (плотность 1550 кг/м³),

108776,6 кг щелока (плотность 1108 кг/м³).

Объём, занятый целлюлозой составит:

$$\frac{10627,9}{1550} + \frac{108776,6}{1108} = 6,9 + 98,2 = 105,1 \text{ м}^3.$$

Перед операцией «Вытеснение» требуется для заполнения черного щелока (1060 кг/м³):

$$110 - 105,1 = 4,9 \text{ м}^3.$$

Масса черного щелока, требуемого для заполнения перед вытеснением:

$$4,9 \times 1060 = 5194,0 \text{ кг на одну котловарку}$$

$$\text{или } \frac{5194,0}{10,6279} = 488,7 \text{ кг на 1 т в.с. целлюлозы.}$$

После заполнения масса черного щелока составит:

$$108776,6 + 5194,0 = 113970,6 \text{ кг на одну котловарку,}$$

$$10235,0 + 488,7 = 10723,7 \text{ кг на 1 т в.с. целлюлозы.}$$

Полученные результаты представлены в табл. 12, 12.1.

Таблица 12 – Тепловой баланс операции «Вытеснение»

Источник тепла	Расчётные данные (приход)	Количество теплоты, кДж
Целлюлоза (T = 170 °C)	$D_3 \times c_{щ} \times T =$ $= 880,0 \times 1,34 \times 170$	200464,0
Черный щелок (T = 170 °C)	$M_{щ,в} \times 3,66 \times T =$ $= 10235,0 \times 3,66 \times 170$	6368217,0
Черный щелок на заполнение (T = 80 °C)	$488,7 \times 4,19 \times 80$	163812,2
Черный щелок на вытеснение (T = 80 °C)	$G \times 4,19 \times 80$	$G \times 335,2$
Итого	-	$6732493,2 + G \times 335,2$

Таблица 12.1 – Тепловой баланс операции «Вытеснение»

Источник тепла	Расчётные данные (приход)	Количество теплоты, кДж
Целлюлоза (T = 90 °С)	$D_3 \times c_{щ} \times T =$ $= 880,0 \times 1,34 \times 90$	106128,0
Черный щелок (T = 90 °С)	$10723,7 \times 4,19 \times 90$	4043907,3
Вытесненный черный щелок (T = 160 °С)	$G \times 4,19 \times 160$	$G \times 670,4$
Итого		$4150035,3 + G \times 670,4$

Теплоёмкость черного щелока:

$$G = \frac{6732493,2 - 4150035,3}{335,2} = 7704,2 \text{ кг.}$$

Концентрация массы в котле после вытеснения:

$$\frac{880 \times 100}{8395,6 + 1098,4 + 564,0 + 880} = 8,0 \text{ \%}.$$

3.3.6. Баланс сухих веществ на операции «Вытеснение»

В начале операции «Вытеснение» в 1 т в.с. целлюлозы находится 10253,0 кг черного щелока, его объём:

$$\frac{10253,0}{1108} = 9,3 \text{ м}^3.$$

В начале данной операции содержится в черном щелоке сухих веществ:

$$S_{ч.щ.в} = S_8 + S + M_5 = 1478,0 + 18,7 + 742,7 = 2239,4 \text{ кг.}$$

Концентрация сухих веществ в этом щелоке:

$$\frac{2239,4}{10235,0} \times 100 = 21,9 \text{ кг.}$$

Количество черного щелока, который подают на заполнение и вытеснение, составляет:

$$488,7 + 7704,2 = 8192,9 \text{ кг.}$$

Объём этого черного щелока:

$$\frac{8192,9}{1060,0} = 7,7 \text{ м}^3.$$

Щелок, который подаётся на заполнение и вытеснение (концентрация сухих веществ 117 г/л), содержат сухих веществ:

$$7,7 \times 117 = 900,9 \text{ кг.}$$

Объём вытесняемого щелока:

$$\frac{7704,2}{1060,0} = 7,3 \text{ м}^3.$$

В начале операции «Вытеснение» в щелоке содержится:

- 7995,6 кг воды;
- 1496,7 кг органических веществ;
- 742,7 кг минеральных веществ.

В щелоке, который подаётся на заполнение и вытеснение, содержится 8000 кг воды;

$$7,7 \times 117,0 \times 0,7 = 630,6 \text{ кг органических веществ};$$

$$7,7 \times 117,0 \times 0,3 = 270,3 \text{ кг минеральных веществ.}$$

В щелоке, который вытесняется, (концентрация щелока – 205 г/л) содержится:

$$7300 \text{ кг воды};$$

$$7,3 \times 205 \times 0,7 = 1047,6 \text{ кг органических веществ};$$

$$7,3 \times 205 \times 0,3 = 449,0 \text{ кг минеральных веществ.}$$

Полученные результаты представлены в табл. 13.

Таблица 13 – Материальный баланс операции «Вытеснение»

Вещества	В котле к концу варки	Переходит в раствор	Приходит со щелоком на вытеснение	Уходит с вытесненным щелоком	После вытеснения
Вода, л (кг)	7995,6	-	7700,0	7300,0	8395,6
Органические вещества, кг					
Целлюлоза	898,7	18,7	-	-	880,0
Растворённые в черном щелоке	1496,7	*→	630,6	1047,6	1098,4
Минеральные вещества, кг	742,7	-	270,3	449,0	564,0
Итого	11115,0	18,7	8600,9	8796,6	10938,0

* – переходит в черный щелок в состав растворённых веществ и учитывается там, т. е. из системы не выводится.

3.3.7. Расчёт и подбор оборудования

Определение необходимого количества варочных котлов

Количество а.с. древесины, которая загружается в 1 м³ варочного котла:

$$402 \times 0,45 = 180,9 \text{ кг.}$$

Выход а.с. целлюлозы с 1 м³ варочного котла:

$$180,9 \times 0,47 = 85,0 \text{ кг.}$$

Выход в.с. целлюлозы с 1 м³ варочного котла:

$$\frac{85,0}{0,88} = 96,6 \text{ кг.}$$

Оборот котла:

$$\frac{210}{60} = 3,5 \text{ ч.}$$

Суточная производительность варочного котла:

$$\frac{96,6 \times 110 \times 24}{1000 \times 3,5} = 72,9 \text{ т в.с. целлюлозы/сут.}$$

Количество варочных котлов:

$$\frac{568}{72,9} = 8 \text{ варочных котлов.}$$

Чтобы обеспечить производительность варочного цеха 568 т в.с. целлюлозы/сут, необходимо 8 варочных котлов.

Допустим, что на предприятии действуют 10 варочных котлов, поэтому возможна большая производительность данного цеха.

Производительность после реконструкции варочного цеха:

$$72,9 \times 10 = 729 \text{ т в. с. целлюлозы/сут.}$$

Расчёт ёмкости выдувного резервуара

Количество в.с. целлюлозы за 1 котловарку составляет 10,6279 т, после вытеснения в котле остаётся 10,2350 т черного щелока, и 9,7 м³ черного щелока после промывки.

Объём цилиндрической части:

$$V = \frac{10,6279 \times 10,2447 \times 2}{0,6} = 363 \text{ м}^3.$$

Определим диаметр D и высоту H цилиндрической части выдувного резервуара для его рассчитанного объёма V. Соотношение H:D - 2:1.

$$V = F \times H; H = 2D; F = \frac{\pi D^2}{4};$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \times 2D = \frac{\pi D^3}{2};$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{2V}{\pi}} = 6,1 \text{ м};$$

$$H = 2 \times 6,1 = 12,2 \text{ м.}$$

Определим высоту конической части выдувного резервуара:

$$H_K = \sqrt{D^2 - \left(\frac{1}{2} \times D\right)^2} = 5,3 \text{ м}^3.$$

Объём конической части выдувного резервуара:

$$V_K = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \times H_K \times \frac{1}{3} = 52 \text{ м}^3.$$

Общий объём выдувного резервуара:

$$363 + 52 = 415 \text{ м}^3.$$

Берём к сведению то, что в наличии 10 котлов, поэтому устанавливаем выдувной резервуар объёмом 630 м³.

Мерник белого щелока

В мернике белого щелока должно помещаться щелока не менее, чем на две варки. Количество белого щелока на одну варку:

$$3,3700 \times 10,6279 = 36 \text{ м}^3.$$

К установке подлежит мерник белого щелока вместимостью 80 м³.

Мерник черного щелока

В мернике черного щелока должно помещаться щелока не менее, чем на две варки. Количество черного щелока на одну варку:

$$6,1375 \times 10,6279 = 65 \text{ м}^3.$$

К установке подлежит мерник черного щелока вместимостью 130 м³.

Бак-аккумулятор белого щелока

В бак-аккумулятор белого щелока должно вмещаться щелока не менее, чем на две варки. Количество белого щелока на одну варку:

$$3,3700 \times 10,6279 = 36 \text{ м}^3.$$

К установке подлежит бак-аккумулятор белого щелока вместимостью 80 м³

Бак-аккумулятор черного щелока

В бак-аккумулятор черного щелока должно вмещаться щелока не менее, чем на две варки.

Количество белого щелока на одну варку:

$$6,1375 \times 10,6279 = 65 \text{ м}^3.$$

К установке подлежит бак-аккумулятор черного щелока вместимостью 130 м³.

Циркуляционный насос

Производительность циркуляционного насоса рассчитывается, исходя из объёма залитой жидкости в котёл, а также кратности циркуляции, которая равна 10. Кратность циркуляции – проход всей жидкости через систему в течение 1 ч. Объём варочной жидкости, которая циркулирует в системе:

$$(3,3700 + 6,1375) \times 10,6279 = 101 \text{ м}^3.$$

Производительность циркуляционного насоса:

$$101 \cdot 10 = 1010 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Мощность вала двигателя:

$$N = \frac{Q \times Y \times H}{100 \times \eta}, \text{ кВт},$$

где Q – производительность циркуляционного насоса, м³/ч;

Y – плотность жидкости, находящаяся в циркуляционном насосе, кг/м³;

H – напор, создаваемый циркуляционным насосом, м вод. ст.;

η – КПД циркуляционного насоса.

$$N = \frac{1010 \times 1146 \times 12}{100 \times 3600 \times 0,7} = 54 \text{ кВт}.$$

К установке подлежит циркуляционный насос с мощностью вала двигателя 55 кВт, напором 12 м вод. ст., частотой вращения 985 м⁻¹.

Подогреватель щелока варочного котла

Производительность циркуляционного насоса 1010 м³/ч. Температура жидкости в подогревателе обязана становиться выше на 5 °С и достичь конечной температуры варки – 170 °С. Чтобы нагреть жидкость до конечной температуры варки, используют пар с давлением P_{абс} = 12 кг/см².

Характеристики насыщенного водяного пара и его конденсата при давлении $P_{абс} = 12 \text{ кг/см}^2$:

- температура насыщения, $t_s = 187,1 \text{ }^\circ\text{C}$;
- теплота парообразования, $r_{t=187,1} = 1990 \text{ кДж/кг}$;
- плотность конденсата, $\rho_1 = 879 \text{ кг/м}^3$;
- вязкость конденсата, $\mu_1 = 0,145 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- теплоёмкость конденсата, $C_1 = 4,47 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг }^\circ\text{C)}$;
- теплопроводность конденсата, $\lambda_1 = 0,67 \text{ Вт/(м }^\circ\text{C)}$.

Характеристики прокачиваемого щелока (при $T = 165 - 170 \text{ }^\circ\text{C}$):

- плотность щелока, $\rho_2 = 1100 \text{ кг/м}^3$;
- теплоёмкость щелока, $C_2 = 3,82 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг }^\circ\text{C)}$;
- вязкость щелока, $\mu_2 = 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- теплопроводность щелока, $\lambda_2 = 0,62 \text{ Вт/(м }^\circ\text{C)}$.

Определение тепловой нагрузки подогревателя

Начальная температура жидкости в подогревателе:

$$t_H = t_{\text{кон}} - 5 = 170 - 5 = 165 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Масса нагреваемой жидкости соответствует производительности циркуляционного насоса:

$$G = 1010 \times 1100 = 1111000 \text{ кг / ч} = 309 \text{ кг / с}.$$

Тепловая нагрузка подогревателя:

$$Q = 309 \times 3,82 \times 10^3 \times (170 - 165) = 5,9 \times 10^6 \text{ Вт}.$$

Средняя разность температур

Средняя температура напора:

$$Q_{\text{ср}} = \frac{(22,1+17,1)}{2} = 19,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура жидкости:

$$t_{\text{сред}} = 187,1 - 19,6 = 167,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Расход пара на нагрев щелока:

$$\frac{5,9 \times 10^6}{1990 \times 10^3} = 2,97 \text{ кг/с} = 10962 \text{ кг/ч}.$$

Выбор подогревателя

Используем в качестве подогревателя вертикальный кожухотрубчатый теплообменник. Массовая скорость щелока $W_{\text{т/о}} = 1500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Сечение труб одного хода:

$$S = \frac{309}{1500} = 0,206 \text{ м}^2.$$

Возьмём двухходовой вертикальный с «плавающей головкой» теплообменник с трубами диаметром 44/40 мм.

Сечение одной трубы «в свету»:

$$S_{\text{тр}} = \frac{3,14 \times 0,04^2}{4} = 0,00126 \text{ м}^2.$$

Общее количество труб в данном двухходовом теплообменнике:

$$\frac{344}{2} = 172.$$

Общая площадь сечения труб одного хода:

$$172 \times 0,00126 = 0,216 \text{ м}^2.$$

Массовая скорость движения жидкости при массе нагреваемой жидкости $G = 309 \text{ кг/с}$:

$$W = \frac{309}{0,216} = 1431 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Определение коэффициента теплоотдачи при конденсации греющего пара
на поверхности вертикальных трубок

Плотность стекания конденсата:

$$K_{\text{пл.ст}} = \frac{2,707}{3,14 \times 0,044 \times 344} = 0,057 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}).$$

Находим критерий $Re_{\text{пл}}$:

$$Re_{\text{пл}} = \frac{(4 \times 0,057)}{0,145 \times 10^{-3}} = 1572.$$

Так как критерий $Re_{\text{пл}}$ больше 400, то критерий $Nu_{\text{пл}}$ для плёнки конденсата:

$$Nu_{\text{пл}} = \frac{Re_{\text{пл}}}{(6,25(Re_{\text{пл}} - 400) \times Pr_{\text{конд}}^{-0,33} + 1580)}.$$

Вычисляем критерий Прандтля для конденсата $Pr_{\text{конд}}$:

$$Pr_{\text{конд}} = \frac{(0,145 \times 10^{-3} \times 4,47 \times 10^3)}{0,67} = 0,967.$$

$$Nu_{\text{пл}} = 0,1749.$$

Определим приведённую толщину плёнки конденсата:

$$\delta_{\text{прив}} = \left(\frac{\mu_1^2}{\rho_1^2 \times g} \right)^{0,33} = 1,404 \times 10^{-5} \text{ м}.$$

Вычислим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1 \times Nu_{\text{пл}}}{\delta_{\text{прив}}} = \frac{0,67 \times 1749}{1,404 \times 10^{-5}} = 8346 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Определение коэффициента теплоотдачи от поверхности труб
к нагреваемому щелоку

Найдём критерий Re_2 для варочного щелока при его массовой скорости $W = 1431 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$:

$$Re_2 = \frac{1431 \times 0,040}{0,48 \times 10^{-3}} = 119250.$$

Вычислим критерий Pr_2 для варочного щелока:

$$Pr_2 = \frac{0,48 \times 10^{-3} \times 3,82 \times 10^3}{0,62} = 2,957.$$

Так как критерий Re_2 больше 10000, то критерий Nu для варочного щелока:

$$Nu_2 = 0,023 \times 117167^{0,8} \times 2,957^{0,4} = 409.$$

Коэффициент теплоотдачи от поверхности труб к нагреваемому щелоку:

$$\alpha_2 = \frac{0,62 \times 409}{0,040} = 6340 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

В данном случае $d_{\text{нар}}/d_{\text{вн}} = 44/40 = 1,1 < 2$, поэтому проводим расчёт для плоской плёнки:

$$K_{\text{т.п-ж}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \left(\frac{\delta_{\text{стен}}}{\lambda_{\text{сталь}}} + r_{\text{загр}}'' \right) + \frac{1}{\alpha_2}} = 2075 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

где $\delta_{\text{стен}}$ – толщина стенки трубы, 0,002 м;

$\lambda_{\text{сталь}}$ – теплопроводность кислотоупорной стали – 17,5 Вт/(м²·°C);

$r_{\text{загр}}''$ – тепловое сопротивление загрязнений со стороны жидкости – 0,00009 м²·°C/Вт.

Поверхность теплообмена

Найдём поверхность теплообмена:

$$F_{\text{т/о}} = \frac{5,9 \times 10^6}{2075 \times 19,6} = 145 \text{ м}^2.$$

Для трубчатых теплообменников поверхность теплообмена находится по формуле:

$$F = \pi \times d_i \times l_{\text{тр}}.$$

Расчётная длина труб $l_{тр}$ подогревателя:

$$l_{тр} = \frac{145}{3,14 \times 0,04 \times 334} = 3,4 \text{ м.}$$

Принимаем длину труб теплообменника – 4 м.

В данном случае получается поверхность теплообмена:

$$F_{т/о \text{ факт}} = 3,14 \times 0,04 \times 344 = 173 \text{ м}^2.$$

Исходя из проведённых расчётов, устанавливаем вертикальный двухходовой кожухотрубчатый теплообменник с «плавающей головкой».

Параметры данного теплообменника:

- площадь поверхности теплообмена – 180 м²;
- количество труб – 344;
- трубный пучок - 44×2;
- высота трубного пучка – 4 м;
- внутренний диаметр кожуха – 800 мм.

По итогам расчетов варочного цеха получены технико-экономические показатели, представленные в табл. 14.

Таблица 14 – Технико-экономические показатели варочного цеха

Наименование расхода	Величина расхода
Расход свежей воды, м ³ /т в. с. ц.	2,9
Расход электроэнергии, кВт · ч/т	55,0
Расход пара, кг/т	804
Расход черного щелока, кг/т в. с. ц.	6137,5
Расход белого щелока, кг/т в. с. ц.	3370
Расход щелока из промывного фильтра, кг/т в. с. ц.	7700

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Непенин, Ю. Н. Технология целлюлозы [Текст] / Ю. Н. Непенин.– М.: Лесная промышленность, 1990. Т. 2. – 600 с.

Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. I. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч.2. Производство полуфабрикатов [Текст] / под ред. П.С. Осипова. – СПб.: Политехника, 2003. – 633 с.

Пен, Р.З. Технология целлюлозы. В 2 т. Т.1. Подготовка древесины. Производство сульфатной целлюлозы [Текст]: учеб. пособие / Р.З. Пен. – 3-е изд., перераб.– Красноярск: СибГТУ, 2006.– 344 с.

Аким, Э.Л. Мировые тенденции в производстве и применении волокнистых полуфабрикатов [Текст] / Э.Л. Аким // Лучшее в технологии, оборудовании и экологии при производстве целлюлозы и других волокнистых полуфабрикатов: сб. материалов Межд. науч.-практ. конф. / СибГТУРП. – СПб., 2010. – С.3-23.

Иванов, Ю.С. Современные тенденции технологии варки сульфатной целлюлозы [Текст] / Ю.С. Иванов // Достижения и проблемы варки и отбелки целлюлозы: науч.- практ. конф. / СибГТУРП. – СПб., 2003. – С. 16-19.

Соловьев, О.В. Оборудование Андритц в системах варки и отбелки [Текст] / О. В. Соловьев // Достижения и проблемы варки и отбелки целлюлозы: науч.-практ. конф. / СибГТУРП. – СПб., 2003. – С. 51-58.

Комплексная химическая переработка древесины: учебник для вузов [Текст] / под ред. проф. И.Н. Ковернинского. – 3-е изд., испр. и доп. – Архан-гельск: Изд-во АГТУ, 2006. – 374 с.

Иванов, Ю.С. Варка сульфатной целлюлозы: тенденции современной технологии [Текст] / Ю.С. Иванов // Лучшее в технологии, оборудовании и экологии при производстве целлюлозы и других волокнистых полуфабрикатов: сб. материалов Межд. науч.-практ. конф. / СибГТУРП. – СПб., 2010. – С.74 – 77.

Аким, Э.Л. Проект «Лиственница». Технология сульфатной варки. Конкурентоспособность периодической и непрерывной варок в условиях реконструкции предприятий [Текст] / Э.Л. Аким, Ю.Г. Мандре, Ю.С. Иванов, М.В. Коваленко, А.Д. Сергеев, Ю.Н. Заяц, С.И. Пондарь // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2011. – №4. – С. 52 – 58

Учебное издание

**Юрий Сергеевич Иванов
Антон Геннадьевич Кузнецов
Владимир Николаевич Селезнев**

**ТЕХНОЛОГИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ
ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СУЛЬФАТНАЯ ВАРКА
С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА**

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.П. Новикова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2021 г., поз.15

Компьютерная верстка Д.А. Романова

Подп. к печати 27.04.21. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1. Печать офсетная.

4,0 уч.- изд. л.; 4,0 усл. печ. л. Тираж 30 экз. Изд. № 15. Цена «С». Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,

СПб., ул.Ивана Черных, 4.