

**Ю.С. Иванов, А.Б. Никандров, А.Г. Кузнецов**

**МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС  
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2018**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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.Б. Никандров, А.Г. Кузнецов**

**МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС**  
**ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург**  
**2018**

УДК 676.022.62-932.4(075)  
ББК 35.77 я 7  
И 190

Иванов Ю.С., Никандров А.Б., Кузнецов А.Г. Материальный и тепловой баланс периодической сульфатной варки: учебное пособие /ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2018. - 65 с.

В учебном пособии представлено краткое описание традиционной технологии сульфатной варки целлюлозы, осуществляемой периодическим способом. Приведены данные для выбора величин, входящих в расчёты материального и теплового балансов периодической варки, даны методики и примеры расчёта основного оборудования варочного цеха сульфат-целлюлозного завода.

Описана технологическая схема варочного производства сульфатной целлюлозы, оснащённого варочными котлами периодического действия.

Пособие предназначено для изучения курсов «Технология целлюлозы», «Технология производства целлюлозы», «Технология ЦБП», «Технологические процессы автоматизированных производств» студентами, обучающимися по направлениям: 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 15.03.04, «Автоматизация технологических процессов и производств ЦБП», 18.03.01 и 18.04.01 «Химическая технология», 29.03.03 и 29.04.03 «Технология полиграфического и упаковочного производства», а также Института безотрывных форм обучения (ИБФО).

Рецензенты:

профессор кафедры технологии бумаги и картона ВШТЭ СПбГУПТД,  
д-р техн. наук Смолин А.С.;

профессор кафедры органической химии СПбГЛТУ им. С.М. Кирова,  
д-р хим. наук Пономарев Д.А.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебного пособия

© Высшая школа технологии  
и энергетики СПбГУПТД, 2018  
© Иванов Ю.С., Никандров А. Б.,  
Кузнецов А. Г., 2018

## Введение

Периодическая сульфатная варка в настоящее время достаточно широко применяется на отечественных предприятиях, а также на зарубежных. При этом если на зарубежных сульфатцеллюлозных заводах почти повсеместно реализуется модернизированная теплоэнергосберегающая технология периодической сульфатной варки, то на отечественных предприятиях сохраняется традиционная технология периодической сульфатной варки. В связи с этим существует необходимость расчётов для традиционного процесса сульфатной варки, тем более что чёткое представление характеристик традиционного процесса варки позволяет лучше увидеть его «слабые места» и оценить технологические преимущества перехода на модернизированную технологию периодической сульфатной варки целлюлозы.

Общие преимущества варки в котлах периодического действия по сравнению с варкой сульфатной целлюлозы в установках непрерывного действия (типа Камюр) заключаются в следующем:

1. Простота конструкции и высокая надёжность оборудования.
2. Гибкость технологического процесса и лёгкость управления им.
3. Возможность обеспечения высокой равномерности провара целлюлозы.
4. Меньшие потери в выработке продукции при остановках оборудования.
5. Лёгкий переход с одного вида сырья на другой и, соответственно, возможность многовариантного обеспечения производства различными видами целлюлозы. Последнее существенно повышает конкурентную способность предприятия в современных условиях.

Однако традиционной периодической сульфатной варке присущи недостатки, которые до последнего времени способствовали распространению технологии непрерывной варки целлюлозы, это:

1. Большой расход тепла (пара) из-за более высокого гидромодуля варки.
2. Залповые выбросы паров и дурнопахнущих газов при сдвухах и, особенно, при выдувке сваренной целлюлозы, что существенно затрудняет их улавливание и обезвреживание.
3. Меньшая эффективность использования паров вскипания чёрного щелока по окончании процесса варки.
4. Образование большего количества дурнопахнущих сточных вод.

Следует отметить, что указанные выше недостатки традиционного периодического процесса практически устранены в модернизированной теплоэнергоэкономичной технологии периодической сульфатной варки, реализованной фирмами «Сундс Дефибратор» (Швеция), «Раума-Репола» и «Целлеко» (Финляндия), «Белойт Корпорейшн» (США), – метод быстрого вытеснительного нагрева (RDH – Rader displacement heating) и процесс «холодной» выгрузки («cold blow»). В дальнейшем объединённая фирма «Сундс-Дефибратор-Раума» разработала модернизированный вариант

периодической варки «Супер Бетч», отличающийся усовершенствованием стадии пропитки и выгрузки массы из котла.

Свой вариант периодической сульфатной варки, отличающийся технологией вытеснения щёлоча «сверху-вниз», под названием «Ener-batch», предложила фирма «Импко-Фест-Альпине».

Эти успехи делают процесс периодической варки не менее привлекательным, чем процесс варки непрерывной, и расширяют круг предприятий, использующих его при организации или совершенствовании производства сульфатной целлюлозы.

### **Варка сульфатной целлюлозы**

Для производства сульфатной целлюлозы применяются два способа варки – периодический и непрерывный. Периодическая варка осуществляется в стационарных варочных котлах с циркуляцией варочного щёлоча и непрямым нагревом. Применение принудительной циркуляции при сульфатной варке имеет особое значение в связи с относительно небольшой продолжительностью процесса. Принудительная циркуляция ускоряет процесс варки, обеспечивая выравнивание температуры и концентрации щёлочи по всему объёму котла, что способствует получению равномерно проваренной целлюлозы с более высоким выходом. Система непрямого обогрева котла обычно дополняет систему принудительной циркуляции, что предотвращает разбавление щёлоча конденсатом греющего пара и улучшает условия варки.

Установка для периодической сульфатной варки состоит из вертикального варочного котла, устройства принудительной циркуляции варочного раствора, (включающего в себя внутреннее кольцевое сито для отбора щёлоча, циркуляционный насос с системой трубопроводов и арматурой), двухходового трубчатого теплообменника с системой отвода конденсата, а также системы автоматического управления. В общем виде эти элементы варочного производства представлены на принципиальной технологической схеме (рис. 1, с. 6-8) периодической варки сульфатной целлюлозы по традиционной технологии.

Варочный котёл представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат с коническим или сферическим верхом и нижним коническим днищем. В последнее время в зарубежной практике днище котлов также стали выполнять сферическим, что способствует лучшему вытеснению щёлоча. Котёл снабжается механизированной плоской дисковой крышкой с пневмоприводом, установленной на верхней горловине. Диаметр верхней горловины - 600 или 800 мм. Варочные котлы зарубежного производства обычно изготавливаются со сферическим верхом с шаровым затвором верхней горловины. Приводной механизм шарового затвора может быть выполнен электрическим, пневматическим или гидравлическим.

Отечественные варочные котлы для установок периодической сульфатной варки производятся АО «Петрозаводскмаш», в основном, ёмкостью 110 и 140 м<sup>3</sup> (тип КВСа-110 и КВСа-140). В зарубежной практике в настоящее время для периодической сульфатной варки используются котлы ёмкостью 200 – 400 м<sup>3</sup>. Котлы изготавливаются из двухслойной стали. Основной слой – мягкая углеродистая сталь типа 20-К или 10-К ( $\delta=20-30$  мм), плакирующий слой ( $\delta\approx 6$  мм) – в зависимости от вида сульфатной варки: для обычной варки – из щёлочестойкой стали 12Х18Н10Т; для варки с предгидролизом – из кислотостойкой стали 08Х17Н15МЗТ.

Рис. 1. Технологическая схема традиционной периодической варки сульфатной целлюлозы:

*Варочная установка периодической варки:*

- 1 – варочный котёл;
- 2 – круговое циркуляционное сито;
- 3 – циркуляционный насос;
- 4 – подогреватель щёлока (кожухотрубчатый теплообменник);
- 5 – греющий пар («глухой пар»);
- 6 – конденсатоотводчик;
- 7 – круговая сдувочная сетка;
- 8 – трубопровод для выдувки массы из котла.

*Установка для конденсации продуктов сдувок и утилизации тепла сдувочных паров:*

- 9 – щелокоуловитель;
- 10 – отделённый щёлок – в бак чёрного щёлока;
- 11 – поверхностный конденсатор (обычно – спиральный теплообменник);
- 12 – сдувочный конденсат;
- 13 – неконденсируемые газы – на дополнительное охлаждение, частичную конденсацию, улавливание и сжигание;
- 14 – флорентина (непрерывно действующий отстойник для разделения скипидара и воды);
- 15 – сырой скипидар;
- 16 – подскипидарная вода (в сток).

*Выдувной резервуар:*

- 17 – выдувной резервуар;
- 18 – приёмная горловина (циклонного типа);
- 19 – разбавляющая часть (коническая) выдувного резервуара;
- 20 – оборотный чёрный щёлок от промывной установки (для разбавления целлюлозной массы);
- 21 – кольцевой коллектор;
- 22 – массный насос (для подачи целлюлозы на сортирование и промывку);
- 23 – трубопровод отвода паров вскипания при выдувке.



*Теплоутилизационная установка для паров вскипания выдувки (типа Розенблад):*

- 24 – смешивающий струйный трубчатый конденсатор;
- 25 – патрубки-сопла охлаждающей воды;
- 26 – подача охлаждающей воды ( $t = 50-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- 27 – горячий конденсат (вместе с водой) –  $t = 90 - 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- 28 – система регулирования температуры горячего конденсата и расхода охлаждающей жидкости;
- 29 – бак-аккумулятор;
- 30 – подвесной «зонт» для забора горячего конденсата;
- 31 – фильтр для отделения волокна;
- 32 – насос для подачи горячего конденсата на охлаждение в теплообменник (работает постоянно);
- 33 – теплообменник (обычно – спиральный; лучший вариант – пластинчатый);
- 34 – подача свежей холодной воды – постоянно;
- 35 – отвод свежей горячей воды, полученной на т/о ( $t = 60-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- 36 – отвод охлаждённого конденсата в бак-аккумулятор ( $t = 50-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – постоянно;
- 37 – заборно-распределительный «зонт» для охлаждённого конденсата бака-аккумулятора;
- 38 – насос подачи охлаждённого конденсата в струйный конденсатор смешения (работает в момент выдувки);
- 39 – переливная труба избыточной воды бака-аккумулятора, образующейся за счёт конденсирующегося пара и капельного уноса черного щёлока с парами вскипания;
- 40 – сточная вода бака-аккумулятора (в сток).

Котлы снабжаются стационарным паровым уплотнителем щепы и промывным коллектором для обмыва внутренней поверхности котла после его опорожнения. К фланцу нижней горловины крепится выдувное (вымывное) колено для вывода массы, имеющее штуцеры для подачи пара и обратного щёлока. Котёл снабжается ситами – заборным (для системы циркуляции), и сдувочным, и в последних модификациях – вымывным (для «холодной» выгрузки массы).

Сульфатную варку целлюлозы периодическим способом осуществляют в следующем порядке. Открывают крышку с пневмоприводом, установленную на верхней горловине котла, и проводят загрузку котла щепой. Загрузка производится из бункеров, установленных над котлами, или с конвейера. Для улучшения последующих процессов пропитки щепы и варки при загрузке подают пар низкого давления (0,35 МПа) в горловину котла через паровой уплотнитель.

При естественной (свободной) загрузке щепы в варочный котёл [1, с. 93-94] объёмная степень загрузки не превышает 0,35 пл. м<sup>3</sup> древесины/м<sup>3</sup>



варочного котла. При этом более влажная щепа или щепа более плотных древесных пород (таких, как берёза или лиственница) укладывается в котле относительно плотнее. Применение пропарки щепы с подачей пара снизу в котёл позволяет поднять объёмную плотность загрузки до 0,35-0,40 пл. м<sup>3</sup> древесины на 1 м<sup>3</sup> варочного котла.

Применение парового уплотнителя при загрузке котла щепой позволяет достичь наилучших результатов по степени заполнения объёма котла щепой. В этом случае плотность загрузки может быть увеличена до 0,4-0,45 пл. м<sup>3</sup> древесины на 1 м<sup>3</sup> котла, при этом здесь наблюдается та же тенденция – более влажная щепа или щепа из более плотной древесины укладывается плотнее.

Величины плотности древесины основных древесных пород по районам произрастания представлены в приложении 1.

По достижении установленного уровня заполнения котла щепой крышку котла закрывают и закачивают щелок на варку – белый и чёрный. Щелок закачивают из баков-мерников. При обычной традиционной сульфатной варке температура щелоков при заливке в котёл составляет примерно 50 ÷ 60 °С для белого и 60 ÷ 80 °С для чёрного.

Последовательность закачки щелоков в котёл обычно такова. Сначала задают небольшое количество чёрного щёлока (из общего расчётного объёма), затем закачивают всё расчётное количество белого щёлока и потом всё остальное количество чёрного щёлока. При таком способе всё рассчитанное количество активной щёлочи белого щёлока попадает в котел, и достигается хорошее перемешивание белого и черного щелоков.

Расход активной щёлочи на варку [1, с. 52-56; рис. 17; с. 95-96; табл. 18] зависит от вида древесины (хвойная или лиственная) и требуемой степени делигнификации целлюлозы. Обычно расход активной щёлочи (предпочтительно в единицах Na<sub>2</sub>O) выражается в процентах от массы абсолютно сухой древесины.

При варке лиственной древесины – минимально от 14,5 % до 16-16,5 % по Na<sub>2</sub>O от массы а. с. древесины; больший расход обычно требуется при варке более плотной древесины (например, берёзы). При варке хвойной – обычно 17-18 % по Na<sub>2</sub>O от массы а. с. древесины.

Объём жидкости в котле при варке определяется гидромодулем (ГМ) – отношением объёма жидкости (в м<sup>3</sup>) к массе 1 т абсолютно-сухой древесины.

В состав жидкости при сульфатной варке входят:

- влага, вносимая со щепой;
- задаваемый белый щёлок (его количество зависит от расхода активной щёлочи на варку и её концентрации в белом щёлоке);
- чёрный щёлок, задаваемый до требуемого гидромодуля при варке. Обычно гидромодуль при периодической варке равен от (3,8) – 4 – 4,2 до (5) на 1 т а. с. древесины [ГМ=(3,8) – 4 – 4,2 – (5) : 1] и зависит от условий принудительной циркуляции щёлока, плотности древесины и плотности загрузки варочного котла. Чёрный щёлок задаётся в количествах, обеспечивающих требуемый ГМ при варке. Используется наиболее

концентрированный чёрный щёлоч, отбираемый от промывки целлюлозы после варки. Его температура обычно -  $60\div 70$  °С. График зависимости плотности чёрного щёлока от содержания в нём сухого остатка (суммарной концентрации растворённых органических и минеральных веществ) приводится в Приложении 2. Более детально эти характеристики чёрного щёлока рассматриваются в литературных источниках [1, с. 317-319; табл. 50] и в [8].

Применение добавки чёрного щёлока улучшает процесс варки, а также способствует повышению концентрации щёлока после варки и экономии тепла при его выпарке [1, с. 68; 94-95].

Следует подчеркнуть: от величины гидромодуля в процессе обычной (не теплоэнергоэкономичной) периодической сульфатной варки в первую очередь зависит расход пара на варку – на нагрев содержимого варочного котла в процессе заварки – здесь как раз тратится значительное количество пара на нагрев большего количества жидкости (при более высоком гидромодуле) до конечной температуры варки.

Технологическая схема на рис. 1 (с. 6-8) даёт представление о составе и взаимосвязях основного оборудования традиционной периодической сульфатной варки. После загрузки щепы и закачки щелоков, занимающих вместе 60 – 90 мин., включают циркуляционный насос, пускают пар в подогреватель и начинают подъём температуры. Таким образом осуществляется нагрев содержимого варочного котла так называемым «глухим паром», то есть подаваемым в теплообменник (в отличие от «острого пара» – когда пар подаётся непосредственно в нагреваемую среду). Температура греющего пара должна быть выше верхних значений температуры варки обычно на 20 – 25 °С (30 °С), то есть примерно 190–200 °С. Такой температуре, считая на сухой насыщенный пар, соответствует давление 1,2 – 1,4 МПа. Пар с более высокой температурой применять не рекомендуется, так как это будет вызывать повышенное «накипеобразование» из щёлока в трубках теплообменника. Пар подаётся в межтрубное пространство, а щёлоч – в трубки теплообменника, что создаёт возможность их очистки от отложений «накипи» при ремонте. Образующийся в теплообменнике конденсат греющего пара, имеющий температуру ~ 180 °С, отводится через конденсатоотводчик и при отсутствии загрязнённости щёлоком должен возвращаться в систему водоснабжения ТЭЦ.

Все варочные котлы снабжены системой принудительной циркуляции щёлока, включающей заборное круговое сито (состоящее из отдельных коробчатых секций и расположенное примерно посередине цилиндрической части варочного котла), центробежный циркуляционный насос и трубопроводы забора и подачи щёлока. Щёлоч, отбираемый через сито, подаётся в теплообменник. Подогретый щёлоч после подогревателя делится примерно поровну и по двум циркуляционным трубам подаётся вверх и вниз котла через специальные штуцеры: по два штуцера в верхней части котла и

один – в нижнем конусе. Диаметры штуцеров определяются объёмом циркулирующего щёлока и зависят от объёма варочного котла и кратности циркуляции. Так, для котла объёмом 140 м<sup>3</sup> они равны 200 мм [10, с. 11, табл. 2, рис. 1].

Производительность циркуляционного насоса непосредственно связана с требуемой скоростью подъёма температуры на стадии заварки, то есть зависит от выбранного режима варки. Для реализации ускоренных режимов варки должна обеспечиваться 8–10-кратная циркуляция всего объёма варочного раствора через подогреватель щёлока в течение 1 часа. Таким образом, поверхность теплообмена подогревателя варочного щёлока также должна быть согласована с объёмом и требуемой скоростью подъёма температуры.

Необходимый напор циркуляционного насоса невысокий и составляет 15–20 м водн. столба несмотря на существенное рабочее давление в варочном котле ~ 8 кг/см<sup>2</sup> (0,8 МПа), так как всасывающая линия циркуляционного насоса также находится под этим давлением суммарно с гидростатическим давлением столба жидкости в варочном котле. Соответственно, потребный напор, создаваемый циркуляционным насосом, ограничивается преодолением динамических сопротивлений в трубопроводах и подогревателе щёлока. Тем не менее, корпус насоса и особенно уплотнения должны рассчитываться на полное рабочее давление и температуру.

Период от начала подъёма температуры до достижения заданной конечной температуры варки носит название «заварка». На стадии заварки по мере нагрева и достижения в варочном котле температуры 100 °С начинает подниматься давление. При наличии значительного количества газов и веществ с пониженной температурой кипения может отмечаться несколько более раннее начало подъёма давления. Выбор конечной температуры варки определяется видом древесины (хвойной или лиственной) – для хвойных обычно 170÷172 °С, для лиственных – несколько ниже ~ 166÷168 °С, а также требованиями к качественным показателям целлюлозы.

Температура варки является основным фактором, влияющим на продолжительность варочного процесса [1, с. 49-52]. Различают два принципиально отличающихся метода ведения процесса: медленная варка и быстрая варка. Основным признаком медленной варки – растянутая заварка с постепенным подъёмом температуры, продолжительность которой может составлять от 3 до 5 часов.

В течение всего времени заварки осуществляется циркуляция щёлока в котле. Быстрая и ускоренная сульфатная варка может применяться для варки как обычной жёсткой целлюлозы, так и белимой целлюлозы (особенно лиственной). Быстрая варка обеспечивается повышением расхода активной щёлочи и конечной температуры варки. Хотя для ускоренной варки часто ограничиваются некоторым увеличением расхода щёлочи без изменения температуры. Основным признаком варок этого типа – ускоренная заварка. Так, продолжительность заварки при производстве жёсткой целлюлозы может

быть сокращена до ~ 50 мин., при варке белимой целлюлозы она может составлять 1-2 ч. При этом сокращение продолжительности заварки компенсируется некоторым увеличением времени стоянки на конечной температуре (по сравнению с обычной варкой). Основное условие получения требуемого качества целлюлозы при быстрой и ускоренной варках – это высокая кратность циркуляции варочного щёлока и надлежущая поверхность теплообмена подогревателя варочного щёлока для обеспечения эффективного тепломассообмена на стадиях заварки и стоянки на конечной температуре (стадия «варка»).

В процессе заварки по достижении температуры около 120 °С проводится так называемая «терпентинная сдувка». Название связано с терпентином (скипидаром), который всегда присутствует при варке хвойных пород (особенно древесины сосны). Тем не менее терпентинную сдувку проводят и при варке лиственной древесины, хотя скипидар там отсутствует. При терпентинной сдувке удаляются из котла остаточные газы и пары легкокипящих соединений. Следует заметить, что температура кипения терпенов, составляющих скипидар, лежит в пределах 157÷178 °С, то есть существенно выше 120 °С, но в процессе сдувки они удаляются совместно с водяным паром как «летучие с паром».

В производственных условиях терпентинную сдувку проводят непрерывно (при умеренном открытии сдувочного вентиля) практически от 120-130 °С и до выхода котла на конечную температуру варки. В момент достижения конечной температуры сдувку и подачу греющего пара в подогреватель щёлока прекращают и выдерживают котёл на конечной температуре при продолжающейся циркуляции щёлока (стадия «варка»).

**На стадии заварки** при подъёме температуры происходит процесс делигнификации древесины с переходом в раствор основной части лигнина и некоторого количества углеводных составляющих (гемицеллюлоз и целлюлозы), что находит своё отражение на кривой выхода на рис. 2. Наиболее активно эти процессы развиваются после 140 °С.

**На стадии варки** происходит дальнейшая делигнификация с переходом в раствор лигнина и углеводной части древесины.

При периодической варке проводят две сдувки: терпентинную (во время подъёма температуры при заварке) и конечную (для снижения давления перед выдувкой). Для улавливания паров побочных продуктов и утилизации тепла сдувочных паров варочная установка оснащается системой «утилизации тепла и продуктов сдувок» [1, с. 119-120; 121-123]. Основные элементы этой системы представлены на рис. 1. Пары сдувок с поверхности жидкости в котле и газопарового пространства котла уходят через сдувочную сетку, расположенную в горловине варочного котла. Для их отвода котёл оснащается сдувочным штуцером диаметром 100 мм (для котла ёмкостью 110 м<sup>3</sup>) и 200 мм (для котла объёмом 140 м<sup>3</sup>) [10, с.11].

Сдувки из варочного котла по сдувочному трубопроводу поступают в щёлокоуловитель, где отделяется жидкий капельный щёлок, увлечённый

паром (так называемый «переброс щёлока при сдувке»). Щёлокоуловитель рассчитывается на полное рабочее давление в варочном котле 1-1,2 МПа и имеет объём 10 - 15 м<sup>3</sup>. Уловленный щёлок периодически сливается в баки-мерники щёлока варочного отдела.

Освобождённые от щёлока парогaзы поступают в конденсатор сдувок, охлаждаемый водой. В качестве поверхностного конденсатора обычно устанавливается спиральный или пластинчатый теплообменник. За счёт тепла конденсации водяных паров охлаждающая вода нагревается до ~ 60÷70 °С и обычно используется для промывки целлюлозы.

Образующийся в результате конденсации паров конденсат сдувок отводится в непрерывно действующий специальный отстойник – флорентину, а несконденсированные пары и газы отводятся на абсорбционную или адсорбционную установку для улавливания и обезвреживания.

В настоящее время применяется двухступенчатое охлаждение сдувочных парогaзов: несконденсированные пары и газы подаются на дополнительный конденсатор, охлаждаемый холодной свежей водой. Получающийся конденсат также поступает во флорентину, а полученная тёплая вода идёт на вход конденсатора 1-й ступени.

Во флорентине происходит непрерывное разделение воды (так называемая «подскипидарная вода») и маслянистого слоя, всплывающего на поверхность и представляющего собой сырой «сульфатный скипидар». Сырой скипидар собирается и отводится на дальнейшую очистку в цех по переработке побочных продуктов, а подскипидарная вода сливается и поступает в общезаводскую систему очистки сточных вод.

По достижении конечной температуры («температуры варки») котёл выдерживают на этой температуре от 1 ч до 2,5 ч – в зависимости от вида варки и, соответственно, температурно-временного графика варки. Подача греющего пара прекращается, но циркуляционный насос остаётся в работе. По истечении этого времени циркуляционный насос останавливают и начинают конечную сдувку. Конечная сдувка парогaзов из варочного котла проводится по тем же коммуникациям, что и терпентинная сдувка. Утилизация тепла и продуктов сдувок может проводиться на той же установке, что и от терпентинной сдувки. Некоторые заводы имеют отдельные установки для терпентинных и конечных сдувок в варочном цехе, что улучшает условия выделения скипидара из конденсата терпентинных сдувок.

Продолжительность конечной сдувки от ~ 30 мин до 1 ч. За это время давление в варочном котле снижают до ~ (4,5)-5,0-5,5-(6,0) кг/см<sup>2</sup>. Соответственно этому давлению снижается и температура в варочном котле за счёт самоиспарения жидкости; образующийся пар конечной сдувки уносится из котла. При этом поток пара захватывает и некоторое количество черного щёлока из котла, – этот щёлок улавливается в щёлокоотделителе и сливается в бак-мерник черного щёлока (при отдельных системах

улавливания и утилизации). Таким образом, выносимые на этой стадии процесса варки вместе со щёлочком из котла органические и минеральные вещества не выводятся из системы и не теряются.

**В процессе конечной сдувки** ещё продолжается конечная делигнификация целлюлозы и растворение углеводных компонентов, что можно видеть на рис. 2.

В зависимости от условий проведения процесса варки и конечной сдувки на этой стадии может ещё дополнительно раствориться 1,0-1,5 % (до 2 %) волокна, считая от массы исходной абсолютно сухой древесины, взятой на варку. Таким образом, величина «выхода целлюлозы по варке» (в %) отвечает всему количеству абсолютно сухого волокна, получающегося в результате варки после конечной сдувки, отнесённому к массе абсолютно сухой древесины, взятой на варку.

По традиционной технологии периодической сульфатной варки полученная целлюлоза выводится из котла выдувкой, то есть за счет остаточного давления пара в варочном котле. Для этого перед самой выдувкой вновь включают циркуляционный насос на 5-10 мин, чтобы несколько разрыхлить массу, и затем открывают выдувной клапан на выдувном колене варочного котла. Масса по выдувному трубопроводу устремляется в выдувной резервуар. Диаметр выдувного колена и трубопровода зависит от объёма варочного котла. Так, например, у котла объёмом 140 м<sup>3</sup> он равен 300 мм [10, с. 11]. Продолжительность выдувки зависит от объёма котла, выхода целлюлозы, давления в варочном котле и обычно составляет от 20 до 40 мин.

Выдувку массы осуществляют в выдувной резервуар [1, с. 104-106]. Он предназначен для приёма целлюлозной массы из варочных котлов, отделения паров вскипания, аккумуляирования массы и разбавления её щёлочком. Как можно видеть по технологической схеме на рис. 1, масса по выдувному трубопроводу под давлением пара поступает в верхнюю часть выдувного резервуара (в так называемую «выдувную головку», её диаметр ~ 3,5 м, высота ~ 3 м). Штуцер ввода массы в выдувную головку имеет тот же диаметр, что и выдувной трубопровод, и расположен тангентально, то есть масса вводится по касательной, и, таким образом, выдувная головка является как бы циклоном для разделения массы и образующихся паров вскипания [10, с. 69-70]. С одной стороны выдувной головки может быть до 3-х приёмных выдувных штуцеров и, аналогично, с противоположной стороны [6, с. 89-90]. Таким образом, максимальное число варочных котлов, которое может быть подсоединено к одному выдувному резервуару не должно превышать 6.

Выдувные резервуары изготавливаются из двухслойной стали 20К+12Х18Н10Т (так называемый «биметалл»), то есть основной материал – мягкая углеродистая сталь 20К, а плакирующий слой толщиной 4-6 мм из щёлочестойкой хромо-никелевой стали с содержанием углерода не более

0,12 % , содержанием хрома (Х) - 18 % , никеля (Н) - 10 % и титана (Т) – до 1 % .

Расчётное давление выдувного резервуара – 0,3 МПа; расчётная температура – 130 °С; рабочий объём – до 800 м<sup>3</sup>.

В процессе выдувки целлюлозной массы (при работе по традиционной технологии) образуется значительное количество пара. Давление в котле после конечной сдувки составляло 0,4-0,6 МПа, что соответствует температуре 152-165 °С, масса из котла с этой температурой попадает в выдувной резервуар, находящийся под атмосферным давлением, – в результате происходит резкое вскипание жидкости. Количество паров вскипания при выдувке весьма значительно и сопоставимо по массе с количеством полученной целлюлозы, а в некоторых случаях может даже превышать его. В общем виде количество паров выдувки *зависит, в первую очередь*, от начального гидромодуля варки (ГМ) и выхода целлюлозы по варке и, во вторую очередь, от давления, с которого производится выдувка, т.е. точнее, температуры той выдуваемой целлюлозной массы, которая покидает варочный котёл. Так, например, наиболее значительное количество паров вскипания при выдувке может образовываться при получении сульфатной целлюлозы для отбелки из древесины лиственницы. В этом случае из-за высокой условной плотности древесины приходится осуществлять варку при повышенном гидромодуле; выход целлюлозы по варке из древесины лиственницы будет пониженным по сравнению с другими хвойными породами (из-за повышенного содержания растворимых веществ углеводного характера – арабиногалактана). Все эти факторы приводят к тому, что количество паров вскипания при выдувке целлюлозы, сваренной из лиственницы, может превышать 900 кг на 1 т воздушно-сухой целлюлозы (на 880 кг абс. сухой целлюлозы). Если считать, что за одну котловарку будет получено 12-14 т воздушно-сухой целлюлозы, то общее количество пара, выделяющегося в этом случае при выдувке за 30-40 мин., составит 11–13 т.

Столь значительное количество пара выделяется за весьма короткий промежуток времени. Поэтому трубопровод для отвода паров вскипания из выдувного резервуара должен иметь достаточно большой диаметр, чтобы не создавалось противодействие в выдувном резервуаре. Так, для выдувного резервуара конструкции «Петрозаводскмаш» [10, с. 69-70] номинальной вместимостью 630 м<sup>3</sup> диаметр отводной трубы для парогазовой смеси – 1000 мм. Вместе с образующимся потоком пара захватывается и уносится некоторое количество чёрного щёлоча с растворёнными в нём органическими и минеральными веществами, а также и волокна целлюлозы. Это так называемые *«уходящие с перебросом щёлоча»* при выдувке. Все они попадают в бак-аккумулятор и оттуда выводятся вместе со сточной водой бака-аккумулятора на общезаводские очистные сооружения, то есть не поступают в систему утилизации органических и регенерации минеральных веществ и безвозвратно теряются.

Теплоутилизационная установка для паров выдувки, представленная в технологической схеме на рис. 1, входит в обязательный состав оборудования для производства сульфатной целлюлозы по *традиционному* периодическому способу сульфатной варки [1, с. 125-130]. Она позволяет утилизировать тепло выделяющихся одномоментно значительных количеств паров вскипания при выдувке целлюлозы из варочного котла и получить за счёт этого тепла ~ 8-10 м<sup>3</sup> свежей горячей воды на тонну в. с. целлюлозы по варке.

Всегда следует помнить, что основное количество тепла, которое несёт водяной пар, заключается именно в том, что он находится в парообразном состоянии, а не в перегреве этого пара. Хотя перегрев пара, например, и позволяет повысить энергетический КПД турбин, и пар в турбинах конденсационного типа используется «до последней возможности», так что температура его не превышает ~ 65 °С на последних ступенях турбины, но, тем не менее, основное количество энергии уходит именно с этим «прохладным» паром в конденсатор, где передаётся охлаждающей воде, то есть переводится на более низкий потенциальный уровень и теряется с энергетической точки зрения. В результате того, что основная энергия пара выделяется при его конденсации, энергетический КПД паровых турбин составляет ~ 30 %. Таким образом, даже утилизируя тепло паров вскипания при выдувке в виде горячей воды при традиционной технологии сульфатной варки, мы переводим систему на более низкий потенциальный уровень из-за выделения и конденсации этого пара. В отличие от этого теплоэнергоэкономичные технологии периодической сульфатной варки не допускают выделения паров вскипания – вся введённая с греющим технологическим паром в систему тепловая энергия сохраняется в различных варочных жидкостях в соответствующих ёмкостях при температурах, превышающих 100 °С под требуемым для этого давлением, и все эти жидкости, имеющие высокую температуру, используются в процессе получения сульфатной целлюлозы, в том числе непосредственно и при самой сульфатной варке.

Возвращаясь к теплоутилизационной установке на технологической схеме (рис. 1), необходимо отметить, что из выдувного резервуара вместе с парами выдувки уносится и «*переброс щёлока*», содержащий растворённые органические и минеральные вещества; с паром уносится также значительное количество летучих дурнопахнущих сероорганических соединений. Все парогазы и капельный унос поступают в основной аппарат теплоутилизационной установки – струйный конденсатор смешения, работающий по принципу водоструйного насоса, имеющего ~ 65-80 таких струйно-инжекционных элементов. Струи охлаждающей воды, под давлением вырывающейся из трубок-сопел, направлены в трубки-диффузоры, в которых происходит смешение и конденсация пара. Температура охлаждающей воды ~ 50-55 °С. В результате конденсации пар отдаёт своё тепло, при этом расход охлаждающей жидкости регулируется автоматически так, чтобы смешанная с горячим конденсатом жидкость имела



температуру ~ 90-95 °С. Эта горячая жидкость, называемая также «горячим конденсатом», содержит, помимо конденсата пара, охлаждающую жидкость, поданную в конденсатор, а также и весь тот чёрный щёлок, захваченный паром в виде «переброса щёлока». Образовавшаяся горячая жидкость («горячий конденсат») стекает в верхнюю часть бака-аккумулятора теплоутилизационной установки. Объём бака-аккумулятора связан с единичным объёмом варочного котла соотношением: на 1 м<sup>3</sup> объёма котла – 1,5–3 м<sup>3</sup> объёма бака-аккумулятора. Верхняя часть бака-аккумулятора, где собирается горячая жидкость, не отделена какой-либо перегородкой от нижней (большей по объёму) части, служащей для накопления охлаждённой жидкости, но обычно граница между горячим и тёплым слоями остаётся чёткой и перемешивания не происходит.

Для утилизации тепла горячая жидкость (с температурой 90-95 °С) отбирается через заборный зонт, подвешенный в баке-аккумуляторе и через фильтр для отделения попавшего волокна подаётся насосом на теплообменник согласно схеме на рис. 1. Для охлаждения используется свежая холодная вода, которая может быть нагрета до температуры ~60-70°С, а «горячий конденсат» при этом охлаждается до температуры ~ 50 °С и через нижний распределительный зонт поступает в нижнюю («холодную») часть бака-аккумулятора. Разность температур в ~ 20 °С между греющей горячей жидкостью бака-аккумулятора и нагреваемой свежей водой обеспечивает получение горячей воды при сравнительно небольшой поверхности теплообменника. Количество горячей свежей воды, которое можно получить от утилизации тепла выдувки, составляет ~ 7-10 м<sup>3</sup> на тонну целлюлозы. Однако здесь можно отметить, что в процессе работы происходит «забивание» теплообменника отложениями волокна, и эффективность теплообмена резко ухудшается, что приводит к понижению температуры нагреваемой свежей воды и повышению температуры охлаждаемой горячей жидкости. Последнее может вызывать снижение эффективности конденсации паров выдувки. Обычно используемые на этом месте спиральные теплообменники трудно очищаются. Поэтому целесообразно применять пластинчатые теплообменники, которые могут быть разобраны для чистки, но они более дорогие.

Система охлаждения «горячего конденсата» работает всё время непрерывно, а система подачи охлаждающей жидкости на струйный конденсатор смешения (имеющая насос большей производительности) включается в работу только на период выдувки. Нормально работающая система обеспечивает конденсацию паров выдувки без введения свежей воды. Наоборот, в баке-аккумуляторе от каждой выдувки накапливается жидкость от конденсирующегося пара, а также и приносимого с паром чёрного щёлока. Неконденсируемые парогазы бака-аккумулятора отводятся в вытяжную трубу и подлежат обезвреживанию. Накапливающаяся избыточная жидкость, так называемая «сточная вода бака-аккумулятора» (содержащая обычно значительное количество дурнопахнущих веществ и загрязнений),

отводится из нижней части бака-аккумулятора по переливной трубе в сток на общезаводские очистные сооружения.

Как можно видеть, использование традиционной технологии сульфатной варки вызывает также повышенные залповые выбросы загрязняющих веществ, особенно дурнопахнущих сероорганических соединений, что также свидетельствует в пользу перехода на модифицированную технологию сульфатной варки.

Тем не менее, проведение расчёта материального и теплового балансов традиционной сульфатной варки и основного оборудования варочного производства должно позволить лучше понять основные положения периодической сульфатной варки и их взаимосвязь в общем процессе и получить конкретные расчётные данные для производства различных видов сульфатной целлюлозы.

### **Исходные данные для расчёта материального баланса**

1. Вид и марка целлюлозы – сульфатная небелёная для электроизоляционного картона, марки ЭК-2 по ГОСТ 12765-87.
2. Степень делигнификации (жёсткость), п.е. (ед. Каппа) – 22 - 27.
3. Вид древесины – сосна.
  - 3.1. Объёмная условная плотность древесины (приложение 1, [4, с. 62-64]), кг/пл. м<sup>3</sup>, (Z) – 409.
4. Выход целлюлозы из древесины, % (B<sub>1</sub>) – 47,2.
5. Влагосодержание щепы, % (W) – 35.
6. Расход активной щёлочи на варку (в ед. Na<sub>2</sub>O), % от абс. сухой древесины (A) – 17,5.
7. Концентрация активной щёлочи в белом щёлоке (в ед. Na<sub>2</sub>O), г/л (C<sub>A</sub>) – 112.
8. Степень сульфидности белого щёлока, %, (C<sub>y</sub>) – 27.
9. Степень каустизации белого щёлока, %, (K) – 82.
10. Степень восстановления белого щёлока, % (B<sub>c</sub>) – 93.
11. Объёмная плотность загрузки варочного котла, пл. м<sup>3</sup> древесины/м<sup>3</sup> варочного котла (X) – 0,39 [1, с. 93-94].
12. Гидромодуль варки (ГМ) – 4,2 : 1.
13. Концентрация чёрного щёлока, заливаемого на варку, % сухих веществ (C<sub>ч. щ.</sub>) – 12,5.
14. Плотность чёрного щёлока, т/м<sup>3</sup> (ρ<sub>ч. щ.</sub>) – 1,067 (приложение 2 или по [1, с. 317-319, табл. 50]).
15. Доля органической части в сухом остатке чёрного щёлока [1, с. 372-373, табл. 55], %, (Орг) – 70.
16. Доля минеральной части в сухом остатке чёрного щёлока [1, с. 372-373, табл. 55], % (M) – 30.

17. Температура варки,  $t_{\text{кон.}}$  – 170 °С.  
 18. Давление в варочном котле после конечной сдувки,  $p_{\text{кон. сд.}}$  – 5,3 кг/см<sup>2</sup>.  
 19. Оборот котла, ч-мин. ( $\Sigma \tau$ ) – 6 ч. 5 мин.  
 20. Объём котла [1, с. 80–82, табл. 15] м<sup>3</sup> - 140.  
 21. Производительность варочного цеха, тонн в. с. целлюлозы/сутки (Q) – 400.

**Распределение времени по операциям в обороте котла (п. 19,  $\Sigma \tau = 6$  ч 25 мин) и график варки:**

19.1. Осмотр	5 мин.
19.2. Загрузка щепой с уплотнением пропаркой	40 мин.
19.3. Закачка щелоков с циркуляцией	40 мин.
19.4. Заварка до температуры 170 °С	2 ч. 25 мин.
19.5. Варка при температуре 170 °С	1 ч. 10 мин.
19.6. Конечная сдувка	35 мин.
19.7. Выдувка массы	30 мин.
Итого:	6 ч. 25 мин.

**Весь расчёт проводится на 1 тонну воздушно-сухой целлюлозы (1 т в. с. ц.) по варке**

Расчёт проводится по следующим стадиям:

1. Загрузка щепы и закачка щелоков.
2. Заварка.
3. Варка.
4. Конечная сдувка.
5. Выдувка массы в выдувной резервуар.

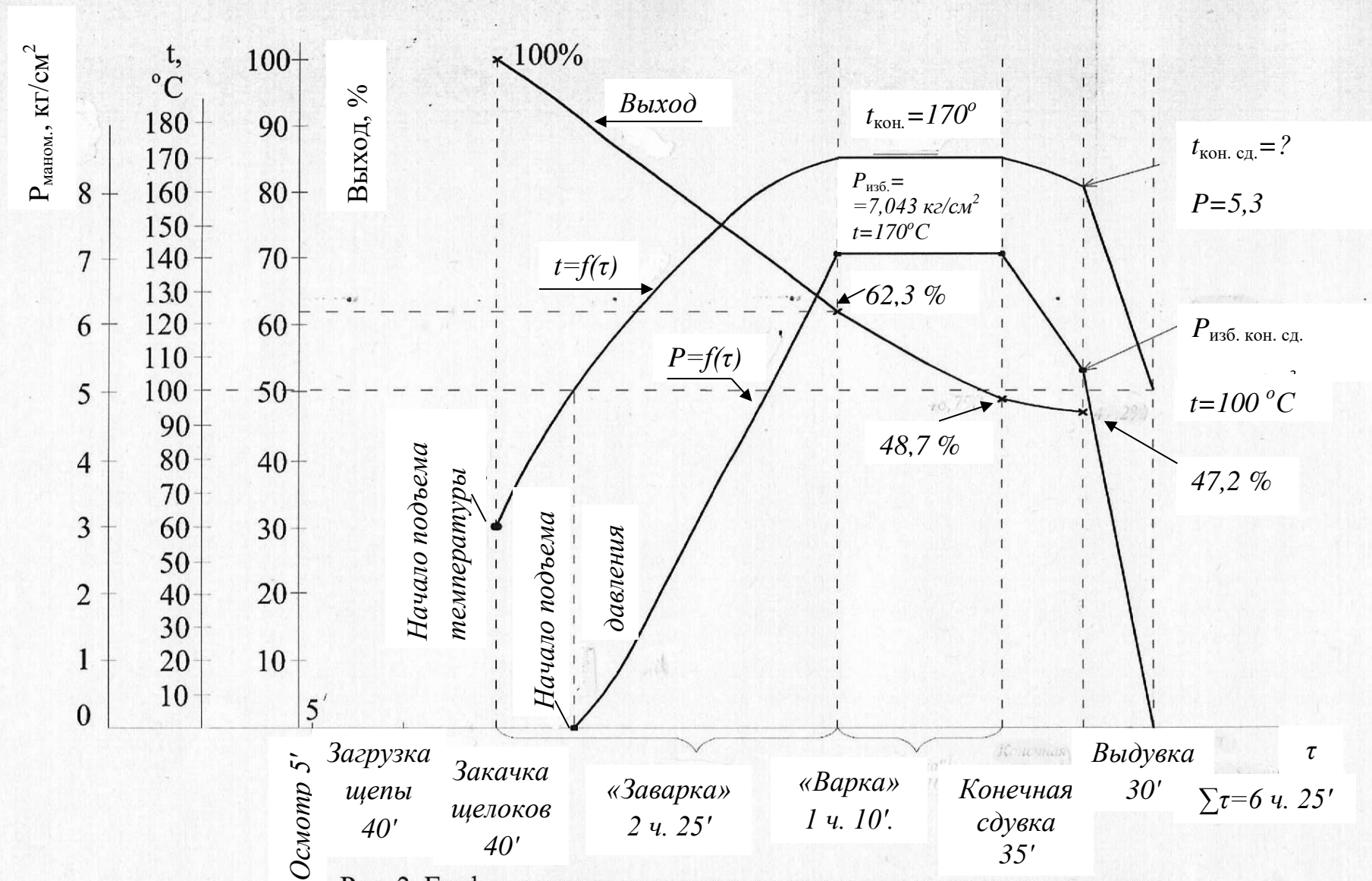


Рис. 2. График изменения выхода, температуры и давления при варке

## 1. Загрузка щепы и закачка щелоков

1.1. 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):

$$D = \frac{880 \times 100}{B_1} = \frac{880 \times 100}{47,2} = 1864,41 \text{ кг абсолютно-сухой древесины (кг а. с. д.)}$$

1.2. Количество воды, поступающей на варку со щепой ( $V_1$ ), при заданной влажности щепы ( $W$ ):

$$V_1 = \frac{D \times W}{100 - W} = \frac{1864,41 \times 35}{100 - 35} = 1003,91 \text{ кг (л)} \approx 1003,9 \text{ л}$$

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

$$V = D \times ГМ = 1864,41 \times 4,2 = 7830,52 \text{ л} \approx 7830,5 \text{ л}$$

1.4. Количество активной щёлочи, задаваемой с белым щёлоком на варку ( $A_1$ ) при заданном расходе активной щёлочи от веса а. с. д. ( $A$ ):

$$A_1 = \frac{D \times A}{100} = \frac{1864,41 \times 17,5}{100} = 326,27 \text{ кг Na}_2\text{O}$$

1.5. Объём белого щёлока, закачанного на варку ( $V_2$ ) при его заданной концентрации ( $C_A$ ):

$$V_2 = \frac{A_1}{C_A} = \frac{326,27 \times 1000}{112} = 2913,1 \text{ л}$$

1.6. Объём чёрного щёлока, закачанного на варку (до заданного гидромодуля)  $V_3$ :

$$V_3 = V - (V_1 + V_2) = 7830,5 - (1003,9 + 2913,1) = 3913,5 \text{ л}$$

1.7. Расчёт состава белого щёлока по его характеристикам в единицах  $\text{Na}_2\text{O}$ :

$$C_{\text{NaOH}} / \text{Na}_2\text{O} = \frac{C_A \times (100 - C_y)}{100} = \frac{112 \times (100 - 27)}{100} = 81,76 \text{ г/л (по Na}_2\text{O)};$$

$$C_{\text{Na}_2\text{S}} / \text{Na}_2\text{O} = \frac{C_A \times C_y}{100} = \frac{112 \times 27}{100} = 30,24 \text{ г/л (по Na}_2\text{O)};$$

$$C_{Na_2CO_3 / Na_2O} = C_{NaOH / Na_2O} \times \frac{100 - K}{K} = 81,76 \times \frac{100 - 82}{82} = 17,95 \text{ г/л (по } Na_2O);$$

$$C_{Na_2SO_4 / Na_2O} = C_{Na_2S / Na_2O} \times \frac{100 - B_c}{B_c} = 30,24 \times \frac{100 - 93}{93} = 2,28 \text{ г/л (} Na_2O).$$

Итого:  $C_{Общ. Na_2O} = 81,76 + 30,24 + 17,95 + 2,28 = 132,23$  г/л в ед.  $Na_2O$ .

1.8. Состав белого щёлока в собственных единицах:

$$C_{NaOH / c.e.} = C_{NaOH / Na_2O} \times \frac{\text{экв.м. } NaOH}{\text{экв.м. } Na_2O} = 81,76 \times \frac{40}{31} = 105,50 \text{ г/л } NaOH.$$

Аналогично:

$$C_{Na_2S / c.e.} = C_{Na_2S / Na_2O} \times \frac{\text{экв.м } Na_2S}{\text{экв.м } Na_2O} = 30,24 \times \frac{39}{31} = 38,04 \text{ г/л } Na_2S;$$

$$C_{Na_2CO_3 / c.e.} = C_{Na_2CO_3 / Na_2O} \times \frac{\text{экв.м } Na_2CO_3}{\text{экв.м } Na_2O} = 17,95 \times \frac{53}{31} = 30,69 \text{ г/л } Na_2CO_3;$$

$$C_{Na_2SO_4 / c.e.} = C_{Na_2SO_4 / Na_2O} \times \frac{\text{экв.м } Na_2SO_4}{\text{экв.м } Na_2O} = 2,28 \times \frac{71}{31} = 5,22 \text{ г/л } Na_2SO_4;$$

Итого:  $C_{Собств.} = 105,50 + 38,04 + 30,69 + 5,22 = 179,45$  г/л в собственных единицах.

1.9. Степень активности белого щёлока ( $A_{акт.}$ ):

$$A_{акт.} = \frac{C_A}{C_{Общ. Na_2O}} = \frac{112}{132,23} = 0,847.$$

1.10. Коэффициент пересчёта (E) натриевых соединений белого щёлока из единиц  $Na_2O$  в собственные единицы:

$$E = \frac{C_{Собств.}}{C_{Общ. Na_2O}} = \frac{179,45}{132,23} = 1,357.$$

1.11. Количество «всей щёлочи» в собственных единицах, поступающей в котёл с белым щёлоком ( $M_1$ ):

$$M_1 = \frac{A_1 \times E}{A_{акт.}} = \frac{326,27 \times 1,357}{0,847} = 522,73 \text{ кг.}$$

1.12. Количество сухих веществ, поступающих в котёл с закачиваемым чёрным щёлоком ( $\Phi_1$ ) при заданной концентрации сухих веществ в чёрном щёлоке ( $C_{ч. ш.}$ ) и его плотности ( $\rho_{ч. ш.}$ ):

$$\Phi_1 = \frac{V_3 \times C_{\text{ч.ш.}} \times \rho_{\text{ч.ш.}}}{100} = \frac{3913,5 \times 12,5 \times 1,067}{100} = 521,96 \text{ кг сухих веществ.}$$

1.13. Количество минеральных веществ, поступающих в котёл с чёрным щёлоком ( $M_2$ ):

$$M_2 = \frac{\Phi_1 \times M}{100} = \frac{521,96 \times 30}{100} = 156,59 \text{ кг,}$$

или в единицах  $\text{Na}_2\text{O}$ :

$$156,59 : 1,357 = 115,39 \text{ кг по } \text{Na}_2\text{O}.$$

1.14. Количество органических веществ, поступающих с чёрным щёлоком на варку ( $S$ ):

$$S = \frac{\Phi_1 \times O_{\text{pe}}}{100} = \frac{521,96 \times 70}{100} = 365,37 \text{ кг растворённых органических веществ,}$$

$$\text{или } S = \Phi_1 - M_2 = 521,96 - 156,59 = 365,37 \text{ кг органических веществ.}$$

1.15. Общее количество минеральных веществ, поступающих с белым и чёрным щёлоком в варочный котёл ( $M_3$ ):

$$M_3 = M_1 + M_2 = 522,73 + 156,59 = 679,32 \text{ кг.}$$

Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Поступление веществ в варочный котёл

Вещества	Со щепой	С белым щёлоком	С чёрным щёлоком	ИТОГО в котле
1. Вода, л (кг)	1003,9	2913,1	3913,5	7830,5
2. Органические вещества, кг:				
- древесина;	1864,41			1864,41
- растворённые в чёрном щёлоке	—	—	365,37	365,37
3. Минеральные вещества, кг	—	522,73	156,59	679,32
ИТОГО:	2868,31	3435,83	4435,46	10739,60
В т. ч. «всей $\text{Na}_2\text{O}$ », кг (при коэффициенте $E=1,357$ – см. п. 1.10)	—	385,21	115,39	500,60

## 2. Заварка

2.1. Согласно имеющимся литературным данным [1], во время терпентинной сдувки выделяется 90 кг пара на 1 т абсолютно сухой древесины. Следовательно, в нашем случае выделится ( $P_1$ ) кг пара:

$$P_1 = 90 \times \frac{1864,41}{1000} = 167,8 \text{ кг пара.}$$

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

$$P_2 = V \times 0,01 = 7830,5 \times 0,01 = 78,3 \text{ л (кг).}$$

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

$$V_4 = V - (P_1 + P_2) = 7830,5 - (167,8 + 78,3) = 7584,4 \text{ л (кг).}$$

2.4. Среднеарифметическое количество жидкости во время заварки ( $V_5$ ):

$$V_5 = \frac{V + V_4}{2} = \frac{7830,5 + 7584,4}{2} = 7707,45 \approx 7707,5 \text{ л (кг).}$$

2.5. Согласно графику изменения выхода в процессе варки (рис. 1) выход на этой стадии – 62,3 %. Тогда количество органических веществ, растворяющихся за время заварки ( $S_1$ ), составит 100 % - 62,3 % = 37,7 %. Соответственно:  $S_1 = D \times 0,377 = 1864,41 \times 0,377 = 702,88$  кг органических веществ.

2.6. По литературным данным [2], на 1 т воздушно-сухой целлюлозы при варке хвойной (сосновой) древесины во время сдувки уходят из котла летучие продукты:

- скипидар – 11 кг;
  - метиловый спирт – 5 кг;
  - метилмеркаптан – 1 кг;
  - диметилсульфид – 3 кг;
- Итого - 20 кг.

**При варке лиственной древесины** в составе продуктов сдувок **не будет скипидара**. Количество других летучих продуктов сдувки:

- метиловый спирт – 8 кг;
  - метилмеркаптан ~ 1 кг;
  - диметилсульфид ~ 3 кг;
- Итого - 12 кг.



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

$$S_2 = S_1 - 20 = 702,88 - 20 = 682,88 \text{ кг.}$$

2.8. Вместе с органическими веществами чёрного щёлока, закачанного в котёл, к концу заварки в растворе будет органических веществ ( $S_3$ ):

$$S_3 = S + S_2 = 365,37 + 682,88 = 1048,25 \text{ кг.}$$

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

$$S_4 = \frac{S + S_3}{2} = \frac{365,37 + 1048,25}{2} = 706,81 \text{ кг.}$$

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

$$O_1 = \frac{S_4}{V_5} = \frac{706,81 \times 1000}{7707,5} = 91,704 \text{ г/л} = 0,091704 \text{ кг/л.}$$

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

$$C_{\text{мин.1}} = \frac{M_1 + M_2}{V_5} = \frac{M_3}{V_5} = \frac{679,32 \times 1000}{7707,5} = 88,138 \text{ г/л} = 0,088138 \text{ кг/л.}$$

2.12. Уходит органических веществ с перебросом щёлока ( $S_5$ ):

$$S_5 = O_1 \times P_2 = 0,091704 \times 78,3 = 7,18 \text{ кг.}$$

2.13. Уходит минеральных веществ с перебросом щёлока ( $M_4$ ):

$$M_4 = C_{\text{мин.1}} \times P_2 = 0,088138 \times 78,3 = 6,90 \text{ кг.}$$

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

$$D_1 = D - S_1 = 1864,41 - 702,88 = 1161,53 \text{ кг древесины.}$$

2.15. Остаётся минеральных веществ в чёрном щёлоке ( $M_5$ ):

$$M_5 = M_3 - M_4 = 679,32 - 6,90 = 672,42 \text{ кг.}$$

2.16. Остаётся органических веществ в чёрном щёлоке ( $S_6$ ):

$$S_6 = S_3 - S_5 = 1048,25 - 7,18 = 1041,07 \text{ кг.}$$

Итоговый материальный *баланс заварки* представлен в табл. 2.

### 3. Варка

В период стоянки на конечной температуре после заварки происходит дальнейшее растворение древесины, и выход снижается до 48,7 %, т. е. после заварки дополнительно растворяется древесины:

$$\Delta = 62,3 \% - 48,7 \% = 13,6 \%$$

3.1. Соответственно, в раствор переходит органических веществ древесины ( $S_7$ ):

$$S_7 = D \times 0,136 = 1864,41 \times 0,136 = 253,56 \text{ кг.}$$

3.2. Остаётся после стоянки на конечной температуре, т. е. после стадии «варка»,

$$D_2 = D_1 - S_7 = 1161,53 - 253,56 = 907,97 \text{ кг древесного вещества (целлюлозы).}$$

Всего растворено в чёрном щёлоке ( $S_8$ ):

$$S_8 = S_6 + S_7 = 1041,07 + 253,56 = 1294,63 \text{ кг органических веществ.}$$

Итоговый материальный баланс стадии «варка» приведён в табл. 3.

Таблица 2

Материальный баланс процесса «заварка»

Вещества	Перед началом заварки	По окончании процесса заварки				
		Уходит при сдувке		Переходит в раствор	Итого уходит	Осталось в котле к концу заварки
		в виде паров	с перебрсами			
1. Вода, л (кг)	7830,5	167,8	78,3	—	246,1	7584,4
2. Органические вещества, кг:						
- древесина;	1864,41	—	—	682,88*	—	1161,53
- летучие продукты;	—	20	—	—	20	—
- растворённые в щёлоке	365,37	—	7,18	*→	7,18	1041,07*
3. Минеральные вещества, кг	679,32	—	6,90	—	6,90	672,42
ВСЕГО:	10739,60	187,8	92,38	682,88*	280,18	10459,42
В том числе «всей $\text{Na}_2\text{O}$ »	500,60	—	5,08	—	5,08	495,52

\*Переходит в чёрный щёлок в состав растворённых органических веществ и учитывается там (\*), т.е. из системы не выводится. Соответственно, баланс системы:

$$\sum = \text{зр.}(7 + 5) = 10459,42 + 280,18 = 10739,60 \text{ кг} = \text{зр.}2$$

Материальный баланс стадии «варка»

Вещества	Было в котле к концу заварки	По окончании стадии «варка»	
		Переходит в раствор (в ч. щ.)	Итого в котле остаётся
1. Вода, л (кг)	7584,4	—	7584,4
2. Органические вещества: - древесина (целлюлоза); - растворённые в чёрном щёлоке	1161,53	253,56*↓	907,97
	1041,07	* →	1294,63*
3. Минеральные вещества	672,42	—	672,42
ВСЕГО:	10459,42	253,56*	10459,42
В том числе «всей Na <sub>2</sub> O»	495,52	-	495,52

\*Переходит в чёрный щёлок в состав растворённых органических веществ и учитывается там (\*), т.е. из системы не выводится.

#### 4. Конечная сдвжка

4.1. Температура варки (стоянки на конечной температуре) согласно исходным данным –  $t_{\text{кон.}} = 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Этой температуре в соответствии с «Таблицами термодинамических свойств воды и водяного пара» [3, стр. 24] или по приложению 3.1 соответствует абсолютное давление пара ( $P_{\text{абс.}}$ ):

$$P_{\text{абс. } t_{\text{кон}} 170^{\circ}\text{C}} = 8,076 \text{ кг/см}^2.$$

Абсолютное давление ( $P_{\text{абс.}}$ ) равно сумме атмосферного давления ( $P_{\text{атм.}}$ ) и избыточного давления ( $P_{\text{изб.}}$ ). В технике и технологических процессах практически всегда задаётся и контролируется избыточное давление, т. е. то, которое показывает манометр.

Атмосферное давление ( $P_{\text{атм.}}$ ), принятое в той или иной системе единиц, может быть точно установлено по данным «Таблиц...» [3] по соответствующему разделу – «Состояние насыщения (по температурам)» или по приложению 3.1:  $P_{\text{атм.}} = P_{\text{абс.}}$  при  $t = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . В данном случае это давление равно  $P_{\text{атм.}} = 1,0332 \text{ кг/см}^2$  [3, с. 22] или по приложению 3.1 (выделенные значения). Исходя из приведённых выше величин, избыточное давление (т. е. то, которое будет показывать манометр вверху котла в паровом пространстве) при температуре  $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$P_{\text{изб. } 170^{\circ}} = P_{\text{абс. } 170^{\circ}} - P_{\text{атм.}} = 8,076 - 1,0332 = 7,0428 \approx 7,043 \text{ кг/см}^2.$$

или в барах:

$$P_{\text{изб. } 170^{\circ}} = 7,0428 \times 0,980665 = 6,9066 \approx 6,907 \text{ бар.}$$

Энтальпия (теплосодержание) жидкости:

$i'_{170^\circ} = 719,2$  кДж/кг по [3, с. 214] или по приложению 3.1.

Обычно в технических расчетах атмосферное давление может быть принято равным  $1,0$  кг/см<sup>2</sup>.

При конечной сдувке давление в котле снижают до  $5 - 6$  кг/см<sup>2</sup>. Пропорционально снижению давления в котле понижается и температура содержимого котла за счёт вскипания жидкости, часть которой переходит в пар и уходит из котла. При интенсивной сдувке часть жидкости подхватывается образующимся паром и уносится вместе с ним в виде капельного уноса.

Все теплотехнические расчёты могут быть проведены с применением системы единиц, основанных на калории (или килокалории, ккал) или по системе СИ, основанной на джоуле (или килоджоуле, кДж). По современным нормативным требованиям проектные расчёты проводят в системе СИ, хотя следует отметить, что предприятия свою теплотехническую отчётность проводят в гигакалориях ( $1 \text{ Гкал} = 10^9 \text{ кал} = 10^6 \text{ ккал}$ ). Можно также отметить, что расчёт, выполненный в ккал для водно-паровых систем, выглядит более наглядно, так как величина удельной теплоёмкости воды в этой системе равна  $1$  ккал/кг·град.

Здесь следует также сказать, что в последнее время в качестве единицы давления используется **Паскаль**<sup>1</sup> (Па; кПа; МПа) по размерности  $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$ .

Проведём теплотехнические расчёты в данном разделе исходя из нормативных требований и заданных условий по температуре варки и давлению после конечной сдувки.

#### 4.2. Установление температуры по заданному давлению при конечной сдувке.

В нашем случае в процессе конечной сдувки давление в котле (манометрическое) снижается до  $5,3$  кг/см<sup>2</sup>. Согласно изложенному выше это – избыточное давление. Для того чтобы можно было применить «Таблицы...» [3] или таблицы приложения 3.2 для определения температуры и других теплотехнических характеристик, необходимо привести это давление к абсолютному.

Здесь необходимо отметить следующее. Для определения теплосодержания жидкости при установленных температуре и давлении лучше использовать табличные данные **по температуре, а не по давлению**. Температура первична, а все остальные термодинамические характеристики ( $P$ ;  $i'$ ;  $g$ ;  $i''$ ) являются производными от неё. Таким образом, это проще, точнее и в большей степени гарантирует от ошибок, так как «шаг» температур в таблицах равен  $1$  °С, и при этом не надо следить за правильностью выбора давления ( $P_{\text{абс.}}$  или  $P_{\text{изб.}}$ , в кг/см<sup>2</sup> или в барах).

---

<sup>1</sup> Это наименование было введено в память о выдающемся французском математике, физике и философе Блезе Паскале (1623-1662 г.г.).

***Рассмотрим точный полный вариант расчёта.***

Для проведения расчёта в системе СИ давление, заданное в  $\text{кг/см}^2$ , необходимо перевести в давление, выраженное в барах ( $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Н/м}^2 = 100 \text{ кПа} = 0,1 \text{ МПа}$ ).

Одна техническая атмосфера –  $1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2$  соответствует  $0,980665 \text{ бар}$  [3, с. 20, табл. 6] или по приложению 3.

Для перехода к абсолютному давлению, к заданной величине избыточного давления (манометрического) необходимо прибавить величину атмосферного давления.

Одна физическая атмосфера  $1 \text{ атм}$  равна  $1,03323 \text{ кг/см}^2$  или  $1,01325 \text{ бар}$  [3, с. 20, табл. 6], или определённая, как указано на предыдущей странице по [3, с. 22 и 213] или по приложению 3.1 для  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Соответственно, исходным данным для нашего случая при давлении (манометрическом) после конечной сдувки –  $P_{\text{кон. сд.}} = 5,3 \text{ кг/см}^2$  абсолютное давление будет равно:

- в системе  $\text{кг/см}^2$ , ккал:

$$P_{\text{абс.}} = P_{\text{изб. маном.}} + P_{\text{атм. кг/см}^2} = 5,3 + 1,0332 = 6,3332 \text{ кг/см}^2 \approx 6,333 \text{ кг/см}^2;$$

- в системе СИ бар; кДж:

$$P_{\text{абс.}} = (P_{\text{изб. маном.}} \times 0,980665) + P_{\text{атм. бар}} = (5,3 \times 0,980665) + 1,0133 = \\ = 5,1975 + 1,0133 = 6,2108 \text{ бар} \approx 6,211 \text{ бар.}$$

Исходя из полученных величин абсолютного давления ( $P_{\text{абс.}}$ ), определяем температуру, которая установится в котле к концу конечной сдувки (методом интерполяции по таблице приложения 3.2, для давления, выраженного в барах) или по «Таблицам...» [3]. Соответственно, в этих же таблицах или в приложении 3.2 находим теплотехнические характеристики для насыщенного водяного пара и жидкости (в кДж/кг).

Проводим соответствующие расчёты с использованием полученных величин.

Конечному манометрическому (избыточному) давлению конечной сдувки  $P_{\text{кон. сд. маном.}} = 5,3 \text{ кг/см}^2$ , как было рассчитано выше, соответствует абсолютное давление  $P_{\text{абс. кон. сд.}} = 6,211 \text{ бар}$ . Этому абсолютному давлению соответствуют по [3, с. 220] или по приложению 3.2 определённые интерполяцией: температура  $t_{\text{кон. сд.}} = 160,19 \text{ }^\circ\text{C}$  и энтальпия жидкости  $i'_{160,19} = 676,30 \text{ кДж/кг}$ .

4.3. При конечной сдувке выделится тепла ( $Q_1$ ) за счёт изменения теплосодержания жидкости в варочном котле:

$$Q_1 = V_4 \times (i'_{170} - i'_{160,19}) = 7584,4 \times (719,2 - 676,3) = 325371 \text{ кДж.}$$

4.4. Некоторое количество тепла выделится также за счёт охлаждения целлюлозы, органических и минеральных веществ ( $Q_2$ ). При средней их теплоёмкости  $q = 1,34$  кДж/кг $\times$ °С:

$$Q_2 = (D_2 + S_8 + M_5) \times q \times (t_{\text{кон.}} - t_{\text{кон. сд.}}) = \\ = (907,97 + 1294,63 + 672,42) \times 1,34 \times (170^\circ - 160,2^\circ) = 37755 \text{ кДж.}$$

4.5. Всего выделится тепла во время конечной сдувки ( $Q_3$ ):

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = 325371 + 37755 = 363126 \text{ кДж.}$$

4.6. Среднее манометрическое давление пара при конечной сдувке ( $P_{\text{ср. кон. сд.}}$ ):

$$P_{\text{ср. кон. сд.}} = \frac{P_{\text{кон. вар.}} + P_{\text{кон. сд.}}}{2} = \frac{7,043 + 5,3}{2} = 6,172 \text{ кг/см}^2,$$

или в барах:  $6,172 \times 0,980665 = 6,052$  бар.

4.7. Соответственно этому, среднее абсолютное давление при конечной сдувке (в барах):

$$P_{\text{абс. ср. кон. сд.}} = P_{\text{ср. кон. сд.}} + P_{\text{атм. бар}} = 6,052 + 1,0133 = 7,065 \text{ бар.}$$

Этому давлению соответствует теплота парообразования, рассчитанная интерполяцией:

$$r_{\text{ср. кон. сд.}} = 2065,7 \text{ кДж/кг пара по [3, с. 220] или по приложению 3.2.}$$

Образуется пара при конечной сдувке ( $P_3$ ):

$$P_3 = Q_3 : r_{\text{ср. кон. сд.}} = 363126 : 2065,7 = 175,79 \approx 175,8 \text{ кг пара.}$$

4.8. При конечной сдувке, помимо испарения жидкости, происходит переброс щёлока. В виде переброса уносится вместе со сдувочными парами примерно 2% жидкости ( $P_4$ ):

$$P_4 = V_4 \times 0,02 = 7584,4 \times 0,02 = 151,7 \text{ л (кг).}$$

4.9. Количество жидкости в котле, остающейся к концу сдувки ( $V_6$ ):

$$V_6 = V_4 - (P_3 + P_4) = 7584,4 - (175,8 + 151,7) = 7256,9 \text{ л (кг).}$$

4.10. Среднее количество жидкости в котле за время конечной сдувки ( $V_7$ ):

$$V_7 = \frac{V_4 + V_6}{2} = \frac{7584,4 + 7256,9}{2} = 7420,65 \sim 7420,7 \text{ л.}$$

4.11. Во время конечной сдувки выход снижается с 48,7 % до 47,2 % согласно кривой выхода на рис. 2, то есть на этой стадии растворяется ещё 1,5 % органического вещества древесины ( $S_9$ ):

$$S_9 = D \times 0,015 = 1864,41 \times 0,015 = 27,966 \approx 27,97 \text{ кг.}$$

4.12. Остаётся твёрдого вещества древесины (целлюлозы) ( $D_3$ ) – *целлюлоза по варке*:

$$D_3 = D_2 - S_9 = 907,97 - 27,97 = \mathbf{880,00 \text{ кг.}}$$

В данном расчёте невязка материального баланса по волокну составила 0,004 кг на 880 кг абсолютно сухого волокна.

4.13. Количество органических веществ в чёрном щёлоке на стадии конечной сдувки ( $S_{10}$ ):

$$S_{10} = S_8 + S_9 = 1294,63 + 27,97 = 1322,60 \text{ кг.}$$

4.14. Среднее количество органических веществ в чёрном щёлоке на стадии конечной сдувки ( $S_{11}$ ):

$$S_{11} = \frac{S_8 + S_{10}}{2} = \frac{1294,63 + 1322,60}{2} = 1308,62 \text{ кг.}$$

4.15. Средняя концентрация растворённых органических веществ во время конечной сдувки ( $O_2$ ):

$$O_2 = S_{11} : V_7 = 1308,62 : 7420,7 = 176,347 \text{ г/л} = 0,176347 \text{ кг/л.}$$

4.16. Количество органических веществ, уходящих из котла с перебором щёлока ( $S_{12}$ ):

$$S_{12} = O_2 \times P_4 = 0,176347 \times 151,7 = 26,75 \text{ кг.}$$

4.17. Средняя концентрация минеральных веществ во время конечной сдувки ( $C_{\text{мин.2}}$ ):

$$C_{\text{мин.2}} = M_5 : V_7 = 672,42 : 7420,7 = 90,614 \text{ г/л} = 0,090614 \text{ кг/л.}$$

4.18. Количество минеральных веществ, уходящих из котла с перебором щёлока ( $M_6$ ):

$$M_6 = C_{\text{мин.2}} \times P_4 = 0,090614 \times 151,7 = 13,75 \text{ кг.}$$

4.19. Остаётся органических веществ в щёлоке к концу конечной сдувки ( $S_{13}$ ):

$$S_{13} = S_{10} - S_{12} = 1322,60 - 26,75 = 1295,85 \text{ кг.}$$

4.20. Остаётся минеральных веществ в щёлоке к концу конечной сдувки ( $M_7$ ):

$$M_7 = M_5 - M_6 = 672,42 - 13,75 = 658,67 \text{ кг.}$$

Материальный баланс конечной сдувки приведён в табл. 4.

Таблица 4

## Материальный баланс конечной сдувки

Вещества	Было в котле к концу стадии «варка»	По окончании конечной сдувки				
		Уходит со сдувкой		Переходит в раствор в чёрный щёлок	Итого уходит	Осталось в котле перед выдувкой
		в виде паров	с перебросами			
1. Вода, л (кг)	7584,4	175,8	151,7	–	327,5	7256,9
2. Органические вещества						
- целлюлоза;	907,97	–	–	27,97* ↓	–	880,00
- растворённые в чёрном щёлоке	1294,63	–	26,75	* →	26,75	1295,85*
3. Минеральные вещества	672,42	–	13,75	–	13,75	658,67
ВСЕГО:	10459,42	175,8	192,20	27,97*	368,00	10091,42
В том числе «всей Na <sub>2</sub> O», кг	495,52	–	10,13	–	10,13	485,39

\*Переходит в чёрный щёлок в состав растворённых органических веществ и учитывается там (\*), т. е. из системы не выводится. Материальный баланс системы:  $\sum = \text{гр.}(7 + 6) = 10091,42 + 368,00 = 10459,42 \text{ кг} = \text{гр. 2}$ .

## 5. Выдувка массы

5.1. Сваренная целлюлоза выдувается из варочного котла в выдувной резервуар под действием избыточного давления в варочном котле. Выдувной резервуар находится под атмосферным давлением. Соответственно, избыточное давление при выдувке падает до 0. В нашем случае с 5,3 кг/см<sup>2</sup> до 0 кг/см<sup>2</sup>. В результате этого жидкость, имеющая в варочном котле температуру выше 100 °С, оказывается перегретой относительно давления в выдувном резервуаре – это вызывает интенсивное вскипание её. Выделяется большое количество пара, с которым уносится избыточное тепло, в результате температура массы (жидкости, целлюлозы и растворённых веществ) снижается примерно до 99° – 100 °С; кипение, соответственно, прекращается.



5.2. Как было определено выше (п. 4.2), избыточному давлению после конечной сдувки, т.е. перед выдувкой, равному  $5,3 \text{ кг/см}^2$ , соответствует абсолютное давление:

$$P_{\text{абс.}} = 6,333 \text{ кг/см}^2 = 6,211 \text{ бар}$$

и температура:

$$t_{\text{кон. сд.}} = 160,19 \text{ }^\circ\text{C} \approx 160,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Энтальпия (теплосодержание) жидкости при этих условиях (см. п. 4.2):

$$i'_{160,19^\circ} = 676,30 \text{ кДж/кг}.$$

Температура массы в выдувном резервуаре  $t_{\text{выд. рез.}} \approx 99 \text{ }^\circ\text{C}$ ; избыточного давления нет, т.е. оно равно 0. Энтальпия жидкости в этих условиях:

$$i'_{99^\circ} = 414,9 \text{ кДж/кг по [3, с. 213] или по приложению 3.1.}$$

Таким образом, при выдувке выделится тепла жидкостью ( $Q_4$ ):

$$Q_4 = V_6 \times (i'_{160,2^\circ} - i'_{99^\circ}) = 7256,9 \times (676,3 - 414,9) = 1896954 \text{ кДж}.$$

5.3. Выделится тепла целлюлозой и сухими веществами чёрного щёлока при их средней теплоёмкости  $q = 1,34 \text{ кДж/кг} \times ^\circ\text{C}$  ( $Q_5$ ):

$$\begin{aligned} Q_5 &= (D_3 + S_{13} + M_7) \times q \times (t_{\text{кон. сд.}} - t_{\text{выд. рез.}}) = \\ &= (880,0 + 1295,85 + 658,67) \times 1,34 \times (160,2^\circ - 99^\circ) = 232453 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

5.4. Суммарное количество выделившегося тепла ( $Q_6$ ):

$$Q_6 = Q_4 + Q_5 = 1896954 + 232453 = 2129407 \text{ кДж}.$$

5.5. Среднее манометрическое давление пара при выдувке ( $P_{\text{ср. выд.}}$ ):

$$P_{\text{ср. выд.}} = \frac{P_{\text{кон. сд.}} + P_{\text{выд. рез.}}}{2} = \frac{5,3 + 0,0}{2} = 2,65 \text{ кг/см}^2,$$

или в барах:

$$2,65 \times 0,980665 = 2,5988 \approx 2,60 \text{ бар}.$$

5.6. Соответственно, среднее абсолютное давление при выдувке ( $P_{\text{абс. ср. выд.}}$ ) в барах:

$$P_{\text{абс. ср. выд.}} = P_{\text{ср. выд.}} + P_{\text{атм. бар}} = 2,60 + 1,0133 \approx 3,613 \text{ бар}.$$

Этому давлению соответствует теплота парообразования (вычисленная интерполяцией по [3, с. 220] или по приложению 3.2):

$$r_{\text{ср. выд.}} = 2144,61 \text{ кДж/кг}.$$

5.7. Образуется паров вскипания при выдувке массы ( $P_5$ ):

$$P_5 = Q_6 : r_{\text{ср. выд.}} = 2129407 : 2144,61 = 992,91 \approx 992,9 \text{ кг пара}.$$

5.8. Таким образом, из котла при выдувке уходит жидкости с массой ( $V_8$ ):

$$V_8 = V_6 - P_5 = 7256,9 - 992,9 = 6264,0 \text{ л.}$$

5.9. Концентрация органических веществ в чёрном щёлоке ( $O_3$ ):

$$O_3 = S_{13} : V_8 = 1295,85 : 6264,0 = 206,873 \text{ г/л} = 0,206873 \text{ кг/л.}$$

5.10. Концентрация минеральных веществ в чёрном щёлоке ( $C_{\text{мин.3}}$ ):

$$C_{\text{мин.3}} = M_7 : V_8 = 658,67 : 6264,0 = 105,152 \text{ г/л} = 0,105152 \text{ кг/л.}$$

5.11. Концентрация сухих веществ в чёрном щёлоке ( $C_{\Phi_2}$ ):

$$C_{\Phi_2} = (S_{13} + M_7) : V_8 = (1295,85 + 658,67) : 6264,0 = \\ = 312,024 \text{ г/л} = 0,312024 \text{ кг/л.}$$

5.12. Примем, что переброс щёлока при выдувке составляет 1,5 % . Тогда вместе с паром в конденсатор смешения уйдёт и будет потеряно чёрного щёлока ( $P_6$ ):

$$P_6 = V_8 \times 0,015 = 6264,0 \times 0,015 = 93,96 \text{ л} \sim 94,0 \text{ л.}$$

5.13. С этим перебросом чёрного щёлока при выдувке будет потеряно сухих веществ ( $\Phi_2$ ):

$$\Phi_2 = C_{\Phi_2} \times P_6 = 0,312024 \times 94,0 = 29,33 \text{ кг.}$$

5.14. С перебросом уйдёт и будет потеряно органических веществ ( $S_{14}$ ):

$$S_{14} = O_3 \times P_6 = 0,206873 \times 94,0 = 19,45 \text{ кг.}$$

5.15. С перебросом уйдёт и будет потеряно минеральных веществ ( $M_8$ ):

$$M_8 = C_{\text{мин.3}} \times P_6 = 0,105152 \times 94,0 = 9,88 \text{ кг.}$$

В пересчёте на  $\text{Na}_2\text{O}$  (Е – см. п. 1.10.) потери составляют:

$$M_8 : E = 9,88 : 1,357 = 7,28 \text{ кг «всей } \text{Na}_2\text{O} \text{»}.$$

5.16. Количество чёрного щёлока с целлюлозой в выдувном резервуаре ( $V_9$ ):

$$V_9 = V_8 - P_6 = 6264,0 - 94,0 = 6170,0 \text{ л.}$$

5.17. В нём растворённых органических веществ ( $S_{15}$ ):

$$S_{15} = S_{13} - S_{14} = 1295,85 - 19,45 = 1276,40 \text{ кг органических веществ.}$$

5.18. В нём растворённых минеральных веществ ( $M_9$ ):

$$M_9 = M_7 - M_8 = 658,67 - 9,88 = 648,79 \text{ кг минеральных веществ,}$$

или в пересчёте на  $\text{Na}_2\text{O}$ :

$$M_9 : E = 648,79 : 1,357 = 478,106 \sim 478,11 \text{ кг «всей } \text{Na}_2\text{O} \text{»}.$$

Материальный баланс выдувки представлен в таблице 5.

Таблица 5

## Материальный баланс выдувки

Вещества	Было в котле в конце сдувки	По окончании выдувки			
		Уходит			Остается в выдувном резервуаре
		в виде паров	с перебросом	Итого уходит	
1. Вода, л (кг)	7256,9	992,9	94,0	1086,9	6170,0
2. Органические вещества, кг:					
- целлюлоза;	880,00	–	–	–	880,00
- растворённые в чёрном щёлоке	1295,85	–	19,45	19,45	1276,40
3. Минеральные вещества, кг	658,67	–	9,88	9,88	648,79
<b>ИТОГО:</b>	<b>10091,42</b>	<b>992,9</b>	<b>123,33</b>	<b>1116,23</b>	<b>8975,19</b>
В том числе «всей Na <sub>2</sub> O», кг	485,39	–	7,28	7,28	478,11

Материальный баланс системы:

$$\sum = \text{гр.}(6+5) = 8975,19 + 1116,23 = 10091,42 \text{ кг} = \text{гр. } 2$$

Сводный материальный баланс периодической сульфатной варки представлен в таблице 6.

Таблица 6

## Сводный материальный баланс периодической сульфатной варки

Вещества	Приход				Переходит в раствор(*)	Расход				Итого уходит	Остается в выдувном резервуаре	Суммарно
	со щелой	с белым щёлком	с чёрным щёлком	Всего		уходит со сдувками		уходит при выдувке				
						в виде пара	с перебросом	В виде пара	с перебросом			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Вода, кг (л)	1003,9	2913,1	3913,5	7830,5	-	343,6	230,0	992,9	94,0	1660,5	6170,0	7830,5
2. Органические вещества, кг:												
- древесина	1864,41	-	-	1864,41	964,41*↓	-	-	-	-	-	880,00	1844,41
- (целлюлоза);												
- газообразные продукты;	-	-	-	-	-	20	-	-	-	20	-	20
- растворённые в щёлоче;	-	-	365,37	365,37	*→	-	33,93	-	19,45	53,38	1276,40*	1329,78
3. Минеральные вещества, кг	-	522,73	156,59	679,32	-	-	20,65	-	9,88	30,53	648,79	679,32
ВСЕГО:	2868,31	3435,83	4435,46	10739,60	964,41*	363,6	284,58	992,9	123,33	1766,29	8975,19	11704,01 (с *)
- в том числе «всей Na <sub>2</sub> O»	-	385,21	115,39	500,60	-	-	15,22	-	7,28	22,50	478,10	500,60

\*Переходит в чёрный щёлок в состав растворённых органических веществ и учитывается там (\*), т. е. из системы не выводится. Материальный баланс системы:  $\Sigma \text{гр.}(12+11) = 8997,07 + 1766,29 = 10763,36 \text{ кг} = \text{гр. 5} = \text{гр. 13} - \text{гр. 6}^*$

## 6. Тепловой баланс периодической сульфатной варки

Для определения более точной величины расхода тепла (пара) на сульфатную варку целлюлозы по традиционной технологии проведём расчёт на обеспечение варочного процесса по всем основным статьям затрат тепла. При этом будут использоваться результаты, полученные в расчёте материального баланса периодической сульфатной варки.

В расчётах теплового баланса варки целлюлозы примем варочный котёл объёмом  $140 \text{ м}^3$  типа «КВСа-140», серийно выпускаемый АО «Петрозаводскмаш» [10, с. 6-8, 9-11].

Исходные данные:

Наружная поверхность корпуса котла, $\text{м}^2$	- 160 = $F_{\text{нар. пов. котла}}$
Средняя толщина стальной стенки, мм	- 30 = $\delta_{\text{стен. котла}}$
Масса корпуса котла с арматурой, т	- 70 = $G_{\text{котла}}$
Толщина тепловой изоляции, мм	- 65 = $\delta_{\text{изоляция}}$
Масса изоляции, т	- 6,3 = $G_{\text{изоляция}}$

Теплоёмкость,  $\text{кДж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C})$ :

– абсолютно-сухой древесины и растворённых органических веществ	- 1,34 = $C_{\text{а. с. д.}}; C_{\text{раств. орг.}}$
– растворённых минеральных веществ	- 1,13 = $C_{\text{раств. мин.}}$
– воды в щёлоче	- 4,19 = $C_{\text{воды}}$
– стали котельной	- 0,50 = $C_{\text{стали}}$
– тепловой изоляции	- 0,92 = $C_{\text{тепл. изол.}}$

Начальные температуры,  $^\circ\text{C}$ :

– щепы и влаги в ней	- 10 = $t_{\text{нач. щепы}}; t_{\text{нач. влаги щепы}}$
– белого щёлока	- 60 = $t_{\text{б. щ. нач.}}$
– чёрного щёлока (при закачке в котёл)	- 70 = $t_{\text{ч. щ. нач.}}$

Средняя температура стального корпуса котла,  $^\circ\text{C}$ :

– перед загрузкой щепы	- 140 = $t_{\text{нач. корп. котла}}$
– в конце заварки	- 170 = $t_{\text{кон. корп. котла}}$

Средняя температура изоляционного слоя,  $^\circ\text{C}$ :

– в начале заварки	- 80 = $t_{\text{изол. нач. завар.}}$
– в конце заварки	- 120 = $t_{\text{изол. кон. завар.}}$

По данным материального баланса:

Для тепловых расчётов *предварительно* должно быть определено количество воздушно-сухой целлюлозы, получаемой после варки из одного варочного котла (то есть с одной котловарки) для варочного котла объёмом  $140 \text{ м}^3$ , по условиям, принятым для расчёта материального баланса.

Соответственно, расчёт - по п. п. 7.1.1; 7.1.2; 7.1.3; 7.1.4.

Выход воздушно-сухой целлюлозы из одного котла объёмом 140 м<sup>3</sup>, кг (по п. 7.1.4):

$$G_{\text{в.с.ц.}} = 11978 \text{ кг}$$

Количество кг, загруженных в котёл, (по п. п. 1.1; 1.2; 1.5; 1.6; 1.11; 1.13; 1.14):

$$G_i^{\text{на котёл}} = G_i^{\text{на 1 т в.с.ц. по расчёту}} \times G_{\text{Т в.с.ц.}}^{\text{1 котловарка}}, \text{ кг}$$

- абсолютно-сухой щепы,

загруженной в котёл

$$(G_{\text{а. с. д.}}) = 1864,41 \times 11,978 = 22332$$

- влаги в щепе

$$(G_{\text{вл. в щепе}}) = 1003,9 \times 11,978 = 12025$$

- воды в белом щёлоке

$$(G_{\text{б. щ.}}) = 2913,1 \times 11,978 = 34893$$

- минеральных веществ в белом щёлоке

$$(G_{\text{минер. б. щ.}}) = 522,73 \times 11,978 = 6261$$

- воды в чёрном щёлоке

$$(G_{\text{ч. щ.}}) = 3913,5 \times 11,978 = 46876$$

- органических веществ в чёрном щёлоке

$$(G_{\text{орг. ч. щ.}}) = 365,37 \times 11,978 = 4376$$

- минеральных веществ в чёрном щёлоке

$$(G_{\text{минер. ч. щ.}}) = 156,59 \times 11,978 = 1876$$

Веществ, уходящих из котла с терпентинной сдвуккой, кг:

(по п. п. 2.1; 2.2; 2.6; 2.12; 2.13)

- водяных паров

$$(G_{\text{вод. пары}}^{\text{Терп. сд.}}) = 167,8 \times 11,978 = 2010$$

- паров органических соединений

$$(G_{\text{орг. пары}}^{\text{Терп. сд.}}) = 20 \times 11,978 = 240$$

- воды в щёлоке (с перебросами)

$$(G_{\text{перебр. ч. щ.}}^{\text{Терп. сд.}}) = 78,3 \times 11,978 = 938$$

- органических веществ в щёлоке

(с перебросами)

$$(G_{\text{перебр. орг.}}^{\text{Терп. сд.}}) = 7,18 \times 11,978 = 86$$

- минеральных веществ в щёлоке

(с перебросами)

$$(G_{\text{перебр. минер.}}^{\text{Терп. сд.}}) = 6,90 \times 11,978 = 83$$

### **Затраты тепла на одну варку**

6.1. Нагрев абсолютно-сухой щепы и растворённых органических веществ (с учётом ухода части из них при терпентинной сдвукке) –  $Q_1$ :

Средняя температура при терпентинной сдвукке на стадии «заварка» до выхода на конечную температуру варки:

$$t_{\text{Ср. терп. сд.}} = \frac{t_{\text{нач. терп. сд.}} + t_{\text{кон.}}}{2} = \frac{120^\circ + 170^\circ}{2} = 145^\circ \text{C}$$

$$\begin{aligned}
Q_1 &= \left[ G_{\text{а. с. д.}} \times c_{\text{а. с. д.}} \times (t_{\text{кон.}} - t_{\text{нач. щепы}}) \right] + \left[ G_{\text{орг. ч. щ.}} \times c_{\text{раств. орг.}} \times (t_{\text{кон.}} - t_{\text{ч. щ. нач.}}) \right] - \\
&\quad - \left[ (G_{\text{орг. пары Терп. сд.}} + G_{\text{перебр. орг. Терп. сд.}}) \times c_{\text{раств. орг.}} \times (t_{\text{кон.}} - t_{\text{Ср. терп. сд.}}) \right] = \\
&= [22332 \times 1,34 \times (170^\circ - 10^\circ)] + [4376 \times 1,34 \times (170^\circ - 70^\circ)] - \\
&\quad - [(240+86) \times 1,34 \times (170^\circ - 145^\circ)] = 5363444 \text{ кДж.}
\end{aligned}$$

6.2. Нагрев влаги в щепе –  $Q_2$ :

$$\begin{aligned}
Q_2 &= \left[ G_{\text{вл. в щепе}} \times c_{\text{воды}} \times (t_{\text{кон.}} - t_{\text{нач. вл. щепе}}) \right] = \\
&= 12025 \times 4,19 \times (170^\circ - 10^\circ) = 8061560 \text{ кДж.}
\end{aligned}$$

6.3. Нагрев белого и чёрного щёлока и растворённых минеральных веществ (с учётом количеств, уходящих при терпентинной сдвукке) –  $Q_3$ :

$$\begin{aligned}
Q_3 &= \left[ (G_{\text{б. щ.}} \times c_{\text{воды}}) + (G_{\text{минер. б. щ.}} \times c_{\text{раств. мин.}}) \right] \times (t_{\text{кон.}} - t_{\text{б. щ. нач.}}) + \\
&\quad + \left[ (G_{\text{ч. щ.}} \times c_{\text{воды}}) + (G_{\text{минер. ч. щ.}} \times c_{\text{раств. мин.}}) \right] \times (t_{\text{кон.}} - t_{\text{ч. щ. нач.}}) - \\
&\quad - \left[ (G_{\text{вод. пары Терп. сд.}} + G_{\text{перебр. ч. щ. Терп. сд.}}) \times c_{\text{воды}} + (G_{\text{перебр. минер. Терп. сд.}} \times c_{\text{раств. мин.}}) \right] \times (t_{\text{кон.}} - t_{\text{Ср. терп. сд.}}) = \\
&= [(34893 \times 4,19) + (6261 \times 1,13)] \times (170^\circ - 60^\circ) + \\
&\quad + [(46876 \times 4,19) + (1876 \times 1,13)] \times (170^\circ - 70^\circ) - \\
&\quad - [(2010 + 938) \times 4,19 + (83 \times 1,13)] \times (170^\circ - 145^\circ) = 36402310 \text{ кДж.}
\end{aligned}$$

6.4. Нагрев корпуса варочного котла –  $Q_4$ :

$$\begin{aligned}
Q_4 &= G_{\text{котла}}^{\text{кг}} \times c_{\text{стали}} \times (t_{\text{кон.}} - t_{\text{нач. корп. котла}}) = \\
&= 70000 \times 0,50 \times (170^\circ - 140^\circ) = 1050000 \text{ кДж.}
\end{aligned}$$

6.5. Нагрев теплоизоляционного слоя –  $Q_5$ :

$$\begin{aligned}
Q_5 &= G_{\text{изоляция}}^{\text{кг}} \times c_{\text{изоляция}} \times (t_{\text{кон. завар.}}^{\text{изол.}} - t_{\text{нач. завар.}}^{\text{изол.}}) = \\
&= 6300 \times 0,92 \times (120^\circ - 80^\circ) = 231840 \text{ кДж.}
\end{aligned}$$

6.6. Потери тепла теплоотдачей –  $Q_6$ :

Принимаем коэффициент теплопередачи через теплоизолированную стенку равным  $K=12 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \times \text{ч} \times ^\circ\text{C})$ .

Начальную температуру содержимого котла примем  $t_{\text{нач. котла}} = 58^\circ\text{C}$ ;

Температура воздуха в помещении  $t_{\text{возд. помещ.}} = 20^\circ\text{C}$ .

Средняя температура содержимого котла за время заварки:

$$T_{\text{Ср. содерж. котла}} = \frac{t_{\text{нач. котла}} + t_{\text{кон.}}}{2} = \frac{58^\circ + 170^\circ}{2} = 114^\circ\text{C}$$

При продолжительности заварки –  $\tau_{заварки} = 2 \text{ ч } 25 \text{ мин } (2,42 \text{ часа})$  и варки на конечной температуре –  $\tau_{стоянки на t_{конечн.}} = 1 \text{ ч } 10 \text{ мин } (1,17 \text{ часа})$ , потери тепла за счёт теплоотдачи составят –  $Q_6$ :

$$\begin{aligned} Q_6 &= K \times F_{\text{наружн. пов. котла}} \times \left[ (t_{\text{Ср. содерж. котла}} - t_{\text{возд.}}) \times \tau_{\text{завар.}} + (t_{\text{кон.}} - t_{\text{возд.}}) \times \tau_{\text{ст. на кон. t}} \right] = \\ &= 12 \times 160 \times \left[ (114^\circ - 20^\circ) \times 2,42 + (170^\circ - 20^\circ) \times 1,17 \right] = 773722 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

#### 6.7. Потери тепла с терпентинной сдувкой – $Q_7$ :

Эти потери включают в себя тепло парообразования водяных паров и органических соединений. При средней температуре терпентинной сдувки –  $t_{\text{Ср. терп. сд.}} = 145^\circ \text{C}$ , для водяного пара теплота парообразования ( $r$ ):

$$r_{\text{т. ср. терп. сд. вод. пар}} = r_{145^\circ} = 2130 \text{ кДж/кг по [3, с. 214], или по приложению 3.1.}$$

Теплоту парообразования для органических соединений примем по скипидару равной  $r_{\text{т. ср. терп. сд. орг. соедин.}} =$  (по скипидару)  $= 287 \text{ кДж/кг}$ . Тогда:

$$\begin{aligned} Q_7 &= \left( G_{\text{вод. пар Терп. сд.}} \times r_{\text{т. ср. терп. сд. вод. пар}} \right) + \left( G_{\text{орг. пары Терп. сд.}} \times r_{\text{орг.}} \right) = \\ &= (2010 \times 2130) + (240 \times 287) = 4350180 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

#### 6.8. Приход тепла от экзотермических реакций – $Q_8$ :

При сульфатной варке, в отличие от сульфитной, за счёт реакции щёлочи с лигнином и другими компонентами древесины выделяется значительное количество тепла, которое по данным Брамера [1, с. 134] составляет 1,2 % от тепла горения древесины. Для сосновой древесины (и в общем виде – **для хвойной**) – теплота сгорания составляет:

$$Q_{\text{горючей массы др. сосны}} \approx 19000 \text{ кДж/кг а.с. древесины}$$

На одну тонну воздушно-сухой целлюлозы получим (для нашего расчёта):

$$19000 \times 0,012 \times 1864,41 = 425086 \text{ кДж/т в. с. ц.,}$$

а на одну котловарку –  $Q_8$ :

$$Q_8 = - (425086 \times 11,978) = - 5091680 \text{ кДж.}$$

**Для древесины лиственных пород** можно принять:

$$Q_{\text{горюч. массы др. листв.}} \approx 18230 \text{ кДж/кг а.с.д.}$$

Основные статьи расхода тепла представлены в табл. 7.

Из табл. 7 видно, что основными статьями расхода тепла являются нагрев влаги в щепе и щёлоча. Тепло экзотермических реакций покрывает около 10 % от общего расхода тепла, что представляет существенную экономию.



### 6.9. Рассчитаем расход пара на варку

Для этого примем, что нагрев щёлока в щёлкоподогревателе варочного котла производится насыщенным паром давлением 1,1 МПа ( $P_{\text{маном. изб.}}$ ), имеющим энтальпию (теплосодержание) –  $i''_{12 \text{ бар абс}} = 2785$  кДж/кг по [3, с. 221] или по приложению 3.2 (при  $P_{\text{абс.}} \approx 1,2$  МПа = 12 бар), а конденсат из подогревателя удаляется с температурой  $t_{\text{конд.}} = 180$  °С.

Тогда расход пара на варку составит (по табл. 7):

$$G_{\text{пар на 1 котловарку}} = \frac{\sum_{1-8} \text{ на 1 котловарку}}{i''_{12 \text{ бар абс.}} - (t_{\text{конд.}} \times c_{\text{воды}})} =$$

$$= \frac{51141376}{2785 - (180^\circ \times 4,19)} = 25183 \text{ кг / на 1 котловарку}$$

Таблица 7

Расход тепла на традиционную периодическую сульфатную варку

Статья расхода	Количество тепла, кДж		Распределение расхода тепла, %
	на одну варку (11,978 т в. с. ц.)	на 1 т воздушно-сухой целлюлозы	
<i>Нагрев:</i>			
$Q_1$ - абсолютно-сухой древесины и растворённых органических веществ	536344	447775	10,49
$Q_2$ - влаги в щепе	8061560	673031	15,76
$Q_3$ - щёлока и растворённых минеральных веществ	36402310	3039098	71,18
$Q_4$ - корпуса котла	1050000	87661	2,05
$Q_5$ - теплоизоляционного слоя	231840	19355	0,45
<i>Потери тепла:</i>			
$Q_6$ - теплоотдачей	773722	64595	1,51
$Q_7$ - с терпентинной сдвудкой	4350180	363181	8,51
<i>Приход тепла</i> от экзотермических реакций: $Q_8$	- 5091680	- 425086	- 9,95
ИТОГО расход тепла: $\sum_{1-8} =$	51141376	4269609	100,00

Или на 1 тонну воздушно-сухой целлюлозы по варке:

$$G_{\text{пар}}^{\text{на 1 т в.с.ц.}} = \frac{\sum_{1-8} \square_{\text{на 1 т в.с.ц.}}}{i''_{12 \text{ бар абс.}} - (t_{\text{конд.}} \times c_{\text{воды}})} = \frac{4269609}{2785 - (180^\circ \times 4,19)} = 2102,43 \approx$$

$$\approx 2103 \text{ кг пара / т в.с. целлюлозы}$$

Если принять потери тепла в паропроводах и с утечками равными 5 %, то удельный расход пара для рассчитанного примера составит:

$$G_{\text{пар уд. расход}}^{\text{на 1 т в.с.ц.}} = 2103 \times 1,05 = 2208,2 \text{ кг пара/т в. с. ц.,}$$

или

$$\sim 2,21 \text{ т пара/т в. с. ц.}$$

Практически всё необходимое для варки количество пара расходуется в период подъёма температуры. Во время стоянки небольшие потери тепла компенсируются приходом тепла от химических реакций.

## 7. Расчёт и подбор оборудования варочного отдела

7.1. Определение необходимого количества варочных котлов [1, с. 80-82; с. 106-108]

Для расчёта необходимо определить количество целлюлозы, получаемое за 1 котловарку ( $G_{\text{к-в}}$ ). Для этого определим выход абсолютно-сухой целлюлозы с 1 м<sup>3</sup> варочного котла ( $L_{\text{а.с.ц.}}$ ):

- при установленной величине объёмной условной плотности древесины сосны (Z) района произрастания (лесосырьевой базы) – 409 кг а. с. д./пл. м<sup>3</sup>;
- объёмной плотности загрузки варочного котла (X) – 0,39 пл. м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> варочного котла;
- выход целлюлозы из древесины (В<sub>1</sub>) – 47,2 %

7.1.1. Количество абсолютно-сухой древесины сосны, загружаемой в 1 м<sup>3</sup> варочного котла ( $T_{\text{а.с.д.}}$ ):

$$T_{\text{а.с.д.}} = Z \times X = 409 \times 0,39 = 159,51 \text{ кг а.с.д./м}^3 \text{ варочного котла.}$$

7.1.2. Выход абсолютно-сухой целлюлозы с 1 м<sup>3</sup> варочного котла ( $L_{\text{а.с.ц.}}$ ):

$$L_{\text{а.с.ц.}} = T_{\text{а.с.д.}} \times B_1 = 159,51 \times 47,2 \% = 159,51 \times 0,472 = 75,289 \approx$$

$$\approx 75,29 \text{ кг а. с. ц./м}^3 \text{ варочного котла.}$$

7.1.3. Выход воздушно-сухой целлюлозы с 1 м<sup>3</sup> варочного котла ( $L_{\text{в.с.ц.}}$ ):

$$L_{\text{в.с.ц.}} = L_{\text{а.с.ц.}} : 0,88 = 75,29 : 0,88 = 85,56 \text{ кг в. с. ц./м}^3 \text{ варочного котла.}$$

7.1.4. Количество воздушно-сухой целлюлозы, получаемой за одну котловарку ( $G_{\text{к-в}}$ ) при объёме варочного котла 140 м<sup>3</sup>

$$G_{\text{к-в}} = L_{\text{в.с.ц.}} \times 140 = 85,56 \times 140 = 11978 \text{ кг} = 11,978 \text{ т в. с. целлюлозы.}$$

7.1.5. Суточная производительность варочного котла ( $G_{\text{к. сут.}}$ ):

$$G_{\text{к. сут.}} = \frac{L_{\text{в.с.ц.}} \times 140 \times 24}{1000 \times \Sigma \tau} = \frac{85,56 \times 140 \times 24}{1000 \times 6,083} = 47,260 \text{ т в. с. целл./}$$

сутки.

Перевод в десятые доли часа: например:

$$\Sigma \tau = 6 \text{ ч. } 5 \text{ мин.} = 6, \frac{5}{60} = 6,083 \text{ ч.}$$

7.1.6. Количество варочных котлов (N):

$$N = Q : G_{\text{к. сут.}} = 400 : 47,26 = 8,46.$$

Принимаем к установке 9 варочных котлов объёмом по 140 м<sup>3</sup> каждый.

7.2. Расчёт ёмкости выдувного резервуара [1, с. 104-106; 6, с. 89-92].

Выдувка сваренной целлюлозы осуществляется в выдувной резервуар. На группу из 2 – 4 котлов (до 6 котлов включительно) устанавливается один выдувной резервуар [1, с. 104; 6, с. 92]. Выдувной резервуар должен вмещать 2 котловарки при условии заполнения его на 60 % [6, с. 92].

Коническая нижняя часть выдувного резервуара используется для разбавления массы промывным чёрным щёлоком, и поэтому её объём не входит в расчётный объём для приёма целлюлозы, выдуваемой из варочных котлов.

В нашем случае количество воздушно-сухой целлюлозы за 1 котловарку:

$$G_{\text{к-в}} = 11,978 \text{ т в.с.ц.}$$

Количество чёрного щёлока на 1 т в. с. ц. равно 6170,0 л (по табл. 5, гр. 6 или по табл. 6, гр. 12). Тогда необходимый объём цилиндрической части ( $V_{\text{цил.в.р.}}$ ):

$$V_{\text{цил.в.р.}} = \frac{11,978 \times 6170 \times 2}{0,6} = 246347 \text{ л} \approx 247 \text{ м}^3.$$

Определим диаметр ( $D_{\text{цил.}}$ ) и высоту ( $H_{\text{цил.}}$ ) цилиндрической части выдувного резервуара для получения его рассчитанного объёма ( $V_{\text{цил.в.р.}}$ ).

У большинства выдувных резервуаров соотношение  $H_{\text{цил.в.р.}} : D_{\text{цил.в.р.}} = 2 : 1$ .

$$V_{\text{цил.}} = F_{\text{цил.}} \times H_{\text{цил.}}; H = 2 D; F = \frac{\pi \times D^2}{4}; \text{ Тогда } V_{\text{цил.в.р.}} = \frac{\pi \times D^2}{4} \times 2D.$$

$$\text{Отсюда } D_{\text{цил.в.р.}}^3 = \frac{2V_{\text{цил.в.р.}}}{\pi};$$

$$D_{\text{цил.в.р.}} = \sqrt[3]{\frac{2V_{\text{цил.в.р.}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{2 \times 247}{3,14}} = \sqrt[3]{157,32} = 5,397 \approx 5,40 \text{ м.}$$

$$H_{\text{цил.в.р.}} = 2D_{\text{цил.в.р.}} = 2 \times 5,40 = 10,80 \text{ м.}$$

Определим размеры конической части.

Угол конуса практически равен  $60^\circ$ , то есть в продольном сечении – это равносторонний треугольник со сторонами равными диаметру ( $D_{\text{цил.в.р.}}$ ), у которого высота равна общему большому катету смежных прямоугольных треугольников. Тогда:

$$h_{\text{кон.в.р.}}^2 = D_{\text{цил.в.р.}}^2 - (1/2 D_{\text{цил.в.р.}})^2$$

или:

$$h_{\text{кон.в.р.}} = \sqrt{D_{\text{цил.в.р.}}^2 - (1/2 D_{\text{цил.в.р.}})^2} = \sqrt{5,4^2 - (0,5 \times 5,4)^2} = \sqrt{21,87} = 4,68 \text{ м.}$$

Объём конической части выдувного резервуара ( $V_{\text{кон.в.р.}}$ ):

$$V_{\text{кон.в.р.}} = \frac{\pi \times D_{\text{цил.в.р.}}^2}{4} \times 1/3 \times h_{\text{кон.в.р.}} = \frac{3,14 \times 5,4^2}{4} \times 1/3 \times 4,68 = 35,709 \approx 35,7 \text{ м}^3.$$

Общая высота выдувного резервуара ( $H_{\text{общ.в.р.}}$ ):

$$H_{\text{общ.в.р.}} = H_{\text{цил.в.р.}} + H_{\text{кон.в.р.}} = 10,80 + 4,68 = 15,48 \text{ м.}$$

Общий объём выдувного резервуара ( $V_{\text{общ.в.р.}}$ ):

$$V_{\text{общ.в.р.}} = V_{\text{цил.в.р.}} + V_{\text{кон.в.р.}} = 247 + 35,7 = 282,7 \approx 283 \text{ м}^3.$$

Принимаем к установке выдувные резервуары объёмом  $V_{\text{в.р.}} = 400 \text{ м}^3$  каждый [1, с. 104, табл. 20]. Количество выдувных резервуаров – 2 шт., так как общее количество устанавливаемых варочных котлов равно 9.

### 7.3. Мерник белого щёлока.

Мерник должен вмещать запас щёлока не менее, чем на две варки при коэффициенте запаса 20 %.

Количество белого щёлока на 1 варку ( $V_{\text{б. щ. к-в}}$ ):

$$V_{\text{б. щ. к-в}} = V_2 \times G_{\text{к-в}} = 2913,1 \times 11,978 = 34893 \text{ л} \sim 35 \text{ м}^3.$$

Соответственно, объём мерника белого щёлока равен:

$$V_{\text{мерн. б.щ.}} = (35 \times 2) + (35 \times 2) \times 0,2 = 84 \text{ м}^3.$$

Принимаем к установке мерник белого щёлока объёмом  $90 \text{ м}^3$ .

### 7.4. Мерник чёрного щёлока.

Мерник должен вмещать запас щёлока не менее чем на две варки при коэффициенте запаса 20 %.

Количество чёрного щёлока на 1 варку ( $V_{\text{ч.щ. к-в}}$ ):

$$V_{\text{ч.щ. к-в}} = V_3 \times G_{\text{к-в}} = 3913,5 \times 11,978 = 46876 \text{ л} \sim 47 \text{ м}^3.$$

Соответственно, объём мерника чёрного щёлока:

$$V_{\text{мерн. ч.щ.}} = (47 \times 2) + (47 \times 2) \times 0,2 = 112,8 \text{ м}^3.$$

Принимаем к установке мерник чёрного щёлока объёмом 115 м<sup>3</sup>.

#### 7.5. Циркуляционные насосы варочных котлов.

Необходимая производительность циркуляционного насоса определяется количеством залитой в котёл жидкости и кратностью циркуляции. Для сульфатной варки кратность циркуляции (количество проходов всего объёма жидкости через систему «варочный котёл-насос-подогреватель щёлока-котёл» в течение 1 часа) находится в пределах 9-14 [1, с. 83-85]. Интенсивность циркуляции определяется требуемой скоростью нагрева содержимого варочного котла. Для заданных условий варки примем кратность циркуляции равной 12.

Объём варочного щёлока, циркулирующего в системе (по п. п. 1.5; 1.6):

$$V_{\text{вар. щ.}} = (V_2 + V_3) \times G_{\text{к-в}} = (2913,1 + 3913,5) \times 11,978 = 81769 \text{ л} = 81,8 \text{ м}^3.$$

При кратности циркуляции, равной 12, производительность циркуляционного насоса должна быть равна  $V_{\text{ц.н.}} = 81,8 \times 12 = 982 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Соответственно, мощность на валу электродвигателя:

$$N = \frac{V_{\text{ц.н.}} \times \gamma \times H}{102 \times \eta} = \frac{0,273 \times 1100 \times 25}{102 \times 0,7} = 105,15 \text{ кВт} \approx 105 \text{ кВт},$$

где  $V_{\text{ц.н.}}$  - производительность насоса, м<sup>3</sup>/с ( $982 \text{ м}^3/\text{ч} : 3600 \text{ с} = 0,273 \text{ м}^3/\text{с}$ );

$\gamma$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup> ( $\approx 1100 \text{ кг/м}^3$  при содержании сухого остатка  $\sim 18-20\%$  - см. табл. 2; 3 и приложение 2);

$H$  - напор, создаваемый насосом, м водн. ст. (25 м водн. ст.);

$\eta$  - КПД насоса ( $\approx 70\%$ ).

#### 7.6. Подогреватель щёлока варочного котла [1, с. 84-87; 5, с. 102-105; 10, с. 18-22].

Рассчитаем теплообменник для нагревания щёлока в системе принудительной циркуляции раствора в варочном котле.

Производительность циркуляционного насоса  $V_{\text{ц.н.}} = 982 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Температура жидкости в подогревателе за один проход должна подниматься на 5 °С и достигнуть конечной температуры варки – 170 °С. Для нагрева используется пар с давлением  $P_{\text{маном.}} \approx 11 \text{ кг/см}^2$ , что соответствует:

$$P_{\text{абс.}} \approx 12 \text{ кг/см}^2, \text{ или } P_{\text{абс. бар}} = 11,77 \text{ бар} = 1,177 \text{ МПа}.$$

Соответственно этому абсолютному давлению насыщенный водяной пар и его конденсат будут иметь следующие характеристики (по приложению 3.2 и по [7, с. с. 547; 986; 748; 930] – с переводом справочных величин в соответствующую размерность.

- температура насыщения,  $t_s$  – 187,08  $\approx$  187,1 °С;
- теплота парообразования,  $\Gamma_{t=187,1^\circ}$  – 1990 кДж/кг;



7.6.3. В настоящее время в качестве подогревателя варочного щёлоча в системе циркуляции обычно используется вертикальный кожухотрубчатый теплообменник. Теплообменные трубы соединены с трубными решётками сваркой по торцам с последующей развальцовкой.

Для ограничения влияния тепловых деформаций, которые весьма вредно отражаются на теплообменниках, обычно применяют один из двух методов. По одному из них верхние концы пучка труб вместе со своей решёткой и съёмной крышкой свободно размещены в верхней части теплообменника (так называемая «плавающая головка»), по другому – используют температурный компенсатор на кожухе при неподвижных трубных решётках.

Нагреваемый щёлоч проходит по трубам, а пар подаётся в межтрубное пространство. Теплообменники могут быть выполнены одно- и двухходовыми (по трубам), за счёт установки продольной перегородки в распределительной камере.

Согласно каталогу ЦИНТИхимнефтемаша [9], разработан спектр кожухотрубчатых теплообменных аппаратов общего и специального назначения *повышенной тепловой эффективности* для нагрева и охлаждения жидких и газообразных сред в технологических процессах нефтяной, химической, нефтехимической и газовой отраслях промышленности. В данном случае, как вариант к установке, мог бы быть рассмотрен вертикальный одноходовой теплообменник повышенной тепловой эффективности с неподвижными решётками и температурным компенсатором на кожухе с трубами диаметром 25×2 мм на условное давление 16 бар. Повышенная тепловая эффективность аппаратов этого типа обеспечивается за счёт уменьшения диаметра теплообменных труб (в этих теплообменниках применяются два типа труб – диаметром 20/2 и 25/2 мм). Уменьшение диаметра труб позволяет существенно увеличить поверхность теплообмена на единицу объёма нагреваемой жидкости. Как можно представить, при изменении диаметра трубы в 2 раза поверхность трубы также изменяется в 2 раза (зависимость линейная), а объём меняется в 4 раза (так как зависимость квадратичная,  $d^2$ ). Таким образом, при уменьшении диаметра трубки её объём сокращается значительно быстрее, чем площадь поверхности. Однако, применение в теплообменнике варочного котла труб уменьшенного диаметра влечёт за собой возникновение трудностей эксплуатационного характера, связанных с забиванием труб и появлением отложений. В этом случае существенно уменьшается проходное сечение труб. Для снижения вредного воздействия этих факторов, в специализированных теплообменниках, которыми комплектуются варочные котлы установок для периодической варки сульфатной целлюлозы, выпускаемых АО «Петрозаводскмаш», применяются трубы большего диаметра – 38×2 мм, при постоянном количестве теплообменных труб – 336 шт., независимо от типоразмера теплообменника; для варьирования площади меняется только высота трубного пучка [10, с. 18-20; 9, с. 27, табл. 5.16].

7.6.4. Проведём расчёт варианта применения в установке периодической варки сульфатной целлюлозы теплообменника АО «Петрозаводскмаш». Теплообменник 2-х ходовой вертикальный с «плавающей головкой».

Согласно каталогу АО «Петрозаводскмаш» [10, с. 18-22], теплообменники выпускаются с трубами  $\varnothing 38/34$  мм. Сечение одной трубы «в свету» ( $S_{\text{тр.}}^1$ ):

$$S_{\text{тр.}}^1 = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн.}}^2}{4} = \frac{3,14 \times 0,034^2}{4} = 0,0009075 \text{ м}^2$$

Количество труб одного хода:

$$N_{\text{тр.}}^1 = N_{\text{тр.}}^{1+2} : 2 = 336 : 2 = 168 \text{ труб.}$$

Общая площадь сечения труб одного хода ( $S_{\text{тр.}}^{N1}$ ):

$$S_{\text{тр.}}^{N1} = 168 \times 0,0009075 = 0,1525 \text{ м}^2.$$

Массовая скорость движения жидкости (при массе нагреваемой жидкости  $G = 300 \text{ кг/с}$ ):

$$W = \frac{G}{S_{\text{тр.}}^{N1}} = \frac{300}{0,1525} = 1967 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с.}$$

7.6.5. Определение коэффициента теплоотдачи при конденсации греющего пара на поверхности вертикальных трубок.

Плотность стекания конденсата:

$$K_{\text{пл.ст.}} = \frac{D_{\text{пар}}}{\pi \cdot d_{\text{тр. нар.}} \cdot N_{\text{тр.}}^{1+2}} = \frac{2,879}{3,14 \cdot 0,038 \cdot 336} = 0,07181 \text{ кг/м} \cdot \text{с.}$$

Находим критерий  $Re_{\text{пл.}}$  для плёнки конденсата:

$$Re_{\text{пл.}} = \frac{4K_{\text{пл.ст.}}}{\mu_1} = \frac{4 \cdot 0,07181}{0,145 \cdot 10^{-3}} = 1981$$

Так как критерий Рейнольдса  $Re_{\text{пл.}} > 400$ , то критерий Нуссельта ( $Nu_{\text{пл.}}$ ) для плёнки конденсата определяем по формуле:

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

предварительно вычислив критерий Прандтля для конденсата ( $Pr_{\text{конд.}}$ ):

$$Pr_{\text{конд.}} = \frac{\mu_1 \cdot c_1}{\lambda_1} = \frac{0,145 \cdot 10^{-3} \cdot 4,47 \cdot 10^3}{0,67} = 0,967.$$

Здесь  $\mu_1$ ;  $c_1$ ;  $\lambda_1$  – параметры конденсата при заданных условиях.



$$Nu_{\text{пл.}} = \frac{1981}{\frac{6,25 \cdot (1981 - 400)}{0,967^{0,33}} + 1580} = 0,1712 .$$

Определим приведённую толщину плёнки конденсата:

$$\delta_{\text{прив.}} = \left( \frac{\mu_1^2}{\rho_1^2 \cdot g} \right)^{0,33} = \left[ \frac{(0,145 \cdot 10^{-3})^2}{879^2 \cdot 9,81} \right]^{0,33} = 1,4003 \cdot 10^{-5} \text{ м} .$$

Вычислим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{\delta_{\text{прив.}}} \cdot Nu_{\text{пл.}} = \frac{0,67}{1,4003 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,1712 = 8191 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C} .$$

7.6.6. Следующий этап – определение коэффициента теплоотдачи от поверхности труб к нагреваемой жидкости.

Вычислим критерий Рейнольдса для жидкости – варочного щёлока ( $Re_2$ ) при её массовой скорости  $W = 1967 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$  (п. 7.6.4):

$$Re_2 = \frac{W \cdot d_{\text{вн.}}}{\mu_2} = \frac{1967 \cdot 0,034}{0,48 \cdot 10^{-3}} = 139329 .$$

Критерий Прандтля для варочного щелока ( $Pr_2$ ):

$$Pr_2 = \frac{\mu_2 \cdot C_2}{\lambda_2} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 3,82 \cdot 10^3}{0,62} = 2,957 ,$$

здесь  $\mu_2$ ;  $C_2$ ;  $\lambda_2$  – параметры нагреваемого варочного щёлока при средней температуре  $t_{\text{ср.}} = 167,5 \text{ °C}$ .

Так как  $Re_2 > 10000$ , то вычисляем критерий Нуссельта для варочного щёлока ( $Nu_2$ ) по уравнению:

$$Nu_2 = 0,023 \cdot Re_2^{0,8} \cdot Pr_2^{0,4} = 0,023 \cdot 139329^{0,8} \cdot 2,957^{0,4} = 463 .$$

По установленному критерию Нуссельта может быть вычислен коэффициент теплоотдачи от поверхности труб к нагреваемому щёлоку ( $\alpha_2$ ):

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2}{d_{\text{внутр.}}} \cdot Nu_2 = \frac{0,62}{0,034} \cdot 463 = 8443 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C} .$$

7.6.7. Вычислим коэффициент теплопередачи от пара к жидкости ( $K_{\text{т. п-ж}}$ ).

Коэффициентом теплопередачи учитывается теплоотдача со стороны горячего теплоносителя ( $\alpha_1$ ), теплоотдача (тепловосприятие) со стороны

нагреваемого щёлока ( $\alpha_2$ ) и термическое сопротивление стенки  $\Sigma(\delta_i / \lambda_i)$ , зависящее от толщины и материала стенки и от отложений на ней.

Для цилиндрической стенки коэффициент  $K_T$  определяется в зависимости от выбранной расчётной поверхности ( $d_{нар.}; d_{вн.}; d_{ср.}$ ).

Если  $d_{нар.i} / d_{вн.i} < 2$ , то  $d_{ср.i} = 0,5(d_{нар.i} + d_{вн.i})$ . В этом случае можно пользоваться формулой коэффициента теплопередачи для плоской стенки, вычисляя в дальнейшем поверхность теплообмена по тому диаметру, со стороны которого коэффициент теплоотдачи ( $\alpha$ ) меньше.

В данном случае  $d_{нар.} / d_{вн.} = 38 / 34 = 1,12 < 2$ , таким образом, проводим расчёт, как для плоской стенки.

$$K_{Т. п-ж.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma \left( \frac{\delta_{стен.}}{\lambda_{сталь}} + r_{загр.}'' \right) + \frac{1}{\alpha_2}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{8191} + \frac{0,002}{17,5} + 0,00009 + \frac{1}{8443}} = 2248 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°С} ,$$

где  $\delta_{стен.}$  — толщина стенки трубы = 0,002 м;

$\lambda_{сталь}$  — теплопроводность кислотоупорной стали = 17,5 Вт/м · °С;

$r_{загр.}''$  — тепловое сопротивление загрязнений (накипи) со стороны жидкости = 0,00009 (м<sup>2</sup> · °С)/Вт.

#### 7.6.8. Поверхность теплообмена

$$F_{т/о} = \frac{Q}{K_{Т. п-ж.} \times \theta_{ср.}} = \frac{5,730 \cdot 10^6}{2248 \times 19,6} = 130,0 \text{ м}^2 ,$$

где  $Q$  — тепловая нагрузка подогревателя (п. 7.6.1) = 5,730 · 10<sup>6</sup> Вт;

$\theta_{ср.}$  — средний температурный напор (п. 7.6.2) = 19,6 °С.

Для трубчатых теплообменников поверхность теплообмена определяется по формуле  $F = \pi \cdot d_i \cdot l_{тр.}$

Проведем расчет по внутреннему диаметру, так как со стороны жидкости коэффициент теплоотдачи меньше;  $d_{\text{вн.}} = 0,034 \text{ м}$ .

Тогда расчётная длина труб подогревателя будет равна

$$l_{\text{тр.}} = \frac{F_{\text{т/о}}}{\pi \cdot d_{\text{вн.}} \cdot N_{\text{тр.}}^{1+2}} = \frac{130}{3,14 \cdot 0,034 \cdot 336} = 3,624 \text{ м}.$$

Принимаем длину труб теплообменника равной 4 м.

Поверхность теплообмена в этом случае будет равна:

$$F_{\text{т/о}} = 3,14 \cdot 0,034 \cdot 4 \cdot 336 = 144 \text{ м}^2.$$

На основании проведённых расчётов и каталога АО «Петрозаводскмаш» [10, с. 18-22; табл. 1, рис. 1] принимаем к установке вертикальный двухходовой кожухотрубчатый теплообменник с плавающей головкой с параметрами:

- площадь поверхности теплообмена,  $F_{\text{т/о}} = 180 \text{ м}^2$  (по наружному диаметру теплообменных труб);
- количество теплообменных труб - 336;
- трубный пучок (трубы 38×2 мм);
- высота трубного пучка,  $h$ , м - 4,5;
- давление в корпусе, МПа - 1,2;
- давление в трубном пространстве, МПа - 1,6;
- расчётная температура корпуса, °С - 210;
- трубного пространства, °С - 170;
- диаметр кожуха внутренний,  $D_{\text{вн.}}$ , мм - 1200;
- габаритная высота (с опорами),  $H$ , м - 7,00;
- масса,  $G$ , т - 8,39.

## Библиографический список

1. Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы. Т. 2. Производство сульфатной целлюлозы.- М.: Лесная промышленность, 1990. - 597 с.
2. Богомолов Б.Д., Соколова А.А. Побочные продукты сульфатно-целлюлозного производства (Химия и технология).- М.: Гослесбумиздат, 1962. - 436 с.
3. Вукалович М.П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара.– Изд. 7-е. – М.-Л.: Энергия, 1965. - 400 с.
4. Инструкция по нормированию расхода древесины в производстве целлюлозы и древесной массы.- М.: Лесная промышленность, 1982. - 65 с.
5. Болдырев Ю.Н., Зорин А.А., Попов В.В. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов целлюлозно-бумажного, лесохимического и гидролизного производств.– 2-е изд.- М.: Лесная пром-сть, 1984. - 224 с.
6. Оборудование целлюлозно-бумажного производства. Т. 1. Оборудование для производства волокнистых полуфабрикатов / под ред. В.А. Чичаева. - М.: Лесная промышленность, 1981. - 368 с.
7. Справочник химика.– 2-е изд.- В 6 т., Т. 1. - М.-Л.: ГХИ, 1963. - 1071 с.
8. Волков А.Д., Григорьев Г.П. Физические свойства щелоков целлюлозного производства. - 2-е изд.- М.: Лесная пром-сть, 1970. - 121 с.
9. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты общего и специального назначения. Каталог ВНИИнефтемаш. - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. – 72 с.
10. Оборудование для целлюлозно-бумажного производства. Книга 1. Оборудование для производства целлюлозы. Химическое оборудование. Каталог АО «Петрозаводскмаш». - Петрозаводск, 1994. - 259 с.
11. Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы. В 3 т., Т. 1. Сырьё и производство полуфабрикатов. Ч. 2. производство полуфабрикатов. – СПб.: Политехника, 2003. - 633 с.

## Приложения

### Приложение 1

#### Плотность древесины основных древесных пород по районам произрастания

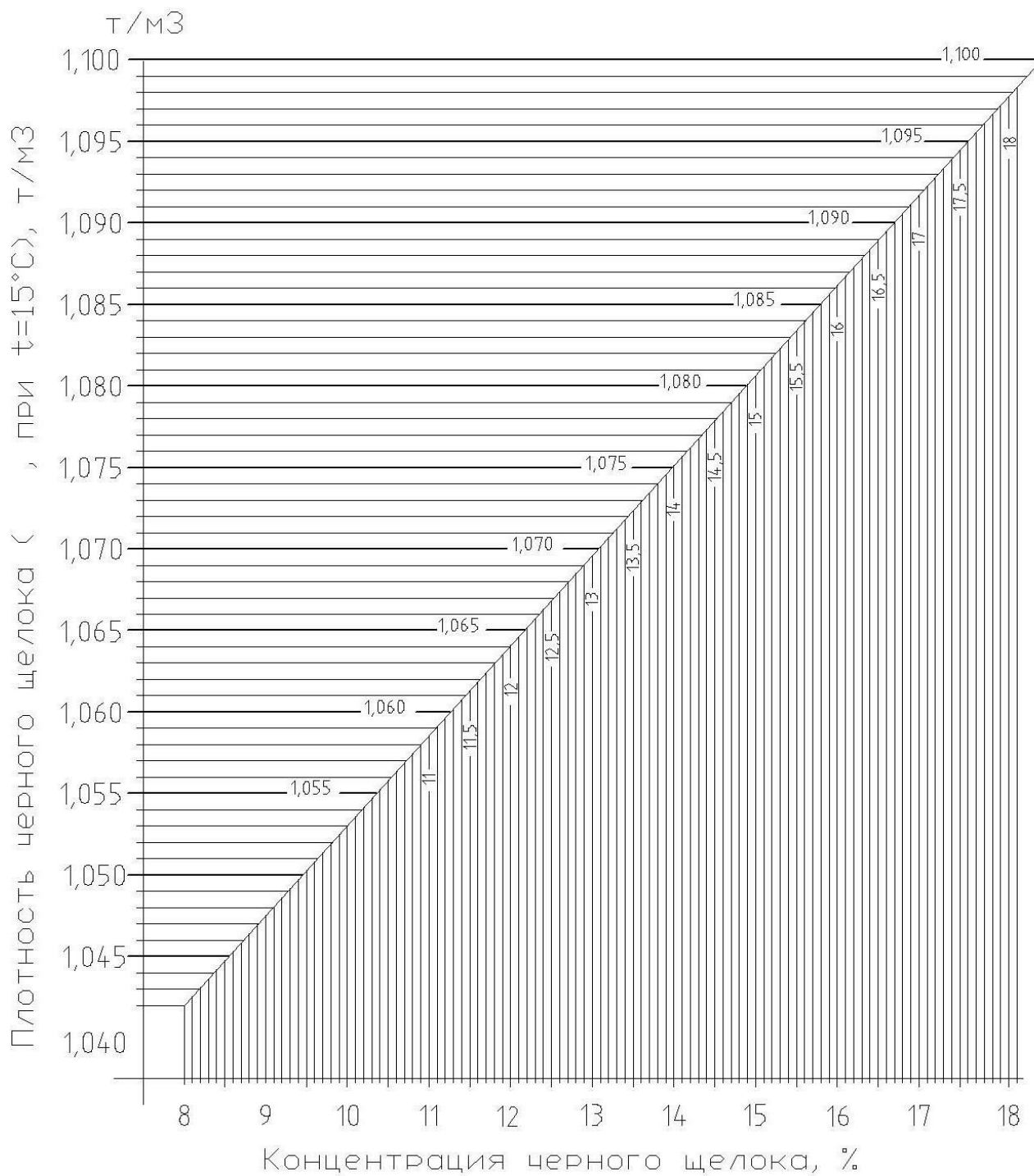
[По кн.: Инструкция по нормированию расхода древесины в производстве целлюлозы и древесной массы. - М.: Лесная промышленность, 1982. - 65 с. (приложение 4, с. 62-64)], [4].

Название древесной породы	Район произрастания	Условная плотность, кг а.с.д./пл. м <sup>3</sup>
Берёза бородавчатая и пушистая	Ленинградская обл.	500
	Республика Карелия	509
	Центральные районы Европейской части России	479
	Урал	502
	Западная Сибирь	502
Бук восточный	Краснодарский край	516
Вяз гладкий	Европейская часть России	436
Дуб черешчатый (летний)	Центральные районы Европейской части России	577
	Краснодарский край	525
Ель саянская	Приморский и Хабаровский края	347
Ель обыкновенная	Север европейской части России	388
	Ленинградская обл.	380
	Центральные районы Европейской части России	365
Ель сибирская	Урал, Восточная Сибирь	350
	Западная Сибирь	310
	Приморский и Хабаровский края	365
Липа амурская	Приморский край	371
Липа мелколистная	Европейская часть России	378
Лиственница сибирская	Север Европейской части России	525
	Урал	525
	Западная Сибирь	509
	Алтай	564
	Восточная Сибирь	494
	Красноярский край	505

Продолжение приложения 1

Название древесной породы	Район произрастания	Условная плотность, кг а.с.д./пл. м <sup>3</sup>
Ольха серая	Ленинградская обл.	363
Осина	Ленинградская обл.	390
	Центральные районы Европейской части России	389
	Приморский и Хабаровский края	334
Пихта сибирская	Урал	310
	Красноярский край	312
	Западная Сибирь	286
	Алтай	326
	Восточная Сибирь	279
Сосна кедровая сибирская (кедр сибирский)	Урал	342
	Красноярский край	350
	Западная Сибирь	350
	Алтай	365
	Восточная Сибирь	357
Сосна обыкновенная	Кольский полуостров	405
	Ленинградская обл.	409
	север Европейской части России	436
	Центральные районы Европейской части России	421
	Западная Сибирь	381
	Восточная Сибирь	373
	Хабаровский край	381
	Европейская часть России	334
Тополь белый	Европейская часть России	334
Тополь чёрный	Европейская часть России	373
Ясень маньчжурский	Приморский и Хабаровский края	524
Ясень обыкновенный	Республика Татарстан, Республика Чувашия	532

Зависимость плотности черного щелока от его концентрации



**Термодинамические свойства воды и водяного пара  
по температуре и давлению**  
(в системах единиц, основанных на кг/см<sup>2</sup> и ккал/кг  
и в системе СИ – в бар и кДж/кг)

$P_{абс}$  – абсолютное давление пара  $P_{абс} = P_{изб} + P_{атм}$

$P_{изб}$  – манометрическое давление пара

$P_{атм}$  – атмосферное давление

$P_{атм} = 1,0332 \text{ кг/см}^2 = 1,0132 \text{ бар} = 0,10132 \text{ МПа}$

$0,1 \text{ МПа} = 100 \text{ КПа} = 1 \text{ бар} = 1,0197 \text{ кг/см}^2 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$

$1 \text{ кг/см}^2 = 0,980665 \text{ бар}; 1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10 \text{ дин/см}^2 = 10^{-5} \text{ бар}$

$i'$  – энтальпия (теплосодержание) кипящей воды – ккал/кг, кДж/кг;

$i''$  – энтальпия (теплосодержание) насыщенного пара – ккал/кг, кДж/кг;

$r$  – скрытая теплота парообразования – ккал/кг, кДж/кг.

[По кн.: М.П.Вукаловича «Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара». Изд. 7-е.- М. - Л.: Энергия, 1965. - 400 с.]

Приложение 3.1

**Состояние насыщения (по температуре)**

В системе: кг/см <sup>2</sup> и ккал/кг					В системе СИ: бар и кДж/кг				
t, °C	$P_{абс}$ , кг/см <sup>2</sup>	$i'$ , ккал/кг	$i''$ , ккал/кг	r, ккал/кг	t, °C	$P_{абс}$ , бар	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	r, кДж/кг
99	0,9971	99,10	638,7	539,6	99	0,9775	414,9	2674	2259
<b>100</b>	<b>1,0332</b>	100,10	639,1	539,0	<b>100</b>	<b>1,0132</b>	419,1	2676	2257
101	1,0707	101,11	639,5	538,4	101	1,0499	423,3	2677	2254
102	1,1092	102,11	639,8	537,7	102	1,0876	427,5	2679	2251
103	1,1489	103,12	640,2	537,1	103	1,1265	431,7	2680	2248
104	1,1898	104,13	640,5	536,4	104	1,1666	436,0	2681	2245
105	1,2318	105,14	640,9	535,8	105	1,2079	440,2	2683	2243
106	1,2751	106,15	641,3	535,2	106	1,2504	444,4	2685	2241
107	1,3196	107,16	641,7	534,5	107	1,2941	448,6	2687	2238
108	1,3654	108,17	642,1	533,9	108	1,3390	452,9	2688	2235
109	1,4125	109,18	642,4	533,2	109	1,3852	457,1	2689	2232
110	1,4609	110,19	642,8	532,6	110	1,4326	461,3	2691	2230
111	1,5106	111,20	643,2	532,0	111	1,4814	465,6	2693	2227
112	1,5618	112,21	643,5	531,3	112	1,5316	469,8	2694	2224
113	1,6144	113,22	643,9	530,7	113	1,5831	474,0	2696	2222
114	1,6684	114,23	644,2	530,0	114	1,6361	478,2	2697	2219



Продолжение приложения 3.1

t, °C	P <sub>абс</sub> , кг/см <sup>2</sup>	i', ккал/кг	i'', ккал/кг	г, ккал/кг	t, °C	P <sub>абс</sub> , бар	i', кДж/к Г	i'', кДж/к Г	г, кДж/к Г
115	1,7239	115,25	644,6	529,4	115	1,6905	482,5	2698	2216
116	1,7809	116,26	645,0	528,7	116	1,7464	486,7	2700	2213
117	1,8394	117,27	645,4	528,1	117	1,8038	491,0	2702	2211
118	1,8995	118,29	645,7	527,4	118	1,8628	495,2	2703	2208
119	1,9612	119,30	646,0	526,7	119	1,9233	499,5	2705	2205
120	2,0245	120,3	646,4	526,1	120	1,9854	503,7	2706	2202
121	2,0895	121,3	646,7	525,4	121	2,0491	507,9	2708	2200
122	2,1561	122,3	647,0	524,7	122	2,1144	512,2	2709	2197
123	2,2245	123,4	647,5	524,1	123	2,1814	516,5	2710	2194
124	2,2947	124,4	647,8	523,4	124	2,2502	520,8	2712	2191
125	2,3666	125,4	648,1	522,7	125	2,3208	525,0	2713	2188
126	2,4404	126,4	648,4	522,0	126	2,3932	529,2	2715	2186
127	2,5160	127,4	648,8	521,4	127	2,4674	533,4	2716	2183
128	2,5935	128,4	649,1	520,7	128	2,5434	537,7	2718	2180
129	2,6730	129,5	649,5	520,0	129	2,6213	542,0	2719	2177
130	2,7544	130,5	649,8	519,3	130	2,7011	546,3	2721	2174
131	2,8378	131,5	650,1	518,6	131	2,7829	550,5	2722	2171
132	2,9233	132,5	650,4	517,9	132	2,8668	554,8	2723	2168
133	3,011	133,5	650,7	517,2	133	2,9528	559,0	2724	2165
134	3,101	134,6	651,1	516,5	134	3,041	563,2	2725	2162
135	3,192	135,6	651,4	515,8	135	3,130	567,5	2727	2159
136	3,286	136,6	651,7	515,1	136	3,222	571,8	2728	2156
137	3,382	137,6	652,0	514,4	137	3,317	576,1	2730	2154
138	3,481	138,7	652,4	513,7	138	3,414	580,4	2731	2151
139	3,582	139,7	652,7	513,0	139	3,513	584,7	2733	2148
140	3,685	140,7	653,0	512,3	140	3,614	589,0	2734	2145
141	3,790	141,7	653,3	511,6	141	3,717	593,3	2735	2142
142	3,898	142,8	653,7	510,9	142	3,823	597,6	2737	2139
143	4,009	143,8	654,0	510,2	143	3,931	601,9	2738	2136
144	4,121	144,8	654,2	509,4	144	4,042	606,2	2739	2133
145	4,237	145,8	654,5	508,7	145	4,155	610,5	2740	2130
146	4,355	146,9	654,8	507,9	146	4,271	614,8	2742	2127
147	4,476	147,9	655,1	507,2	147	4,389	619,1	2748	2124
148	4,599	148,9	655,4	506,5	148	4,510	623,4	2744	2121
149	4,725	150,0	655,7	505,7	149	4,634	627,8	2745	2117
150	4,854	151,0	656,0	505,0	150	4,760	632,2	2746	2114
151	4,985	152,0	656,3	504,3	151	4,889	636,6	2748	2111
152	5,119	153,1	656,7	503,6	152	5,020	641,0	2749	2108
153	5,257	154,1	657,0	502,9	153	5,155	645,3	2750	2105
154	5,397	155,1	657,2	502,1	154	5,293	649,6	2752	2102
155	5,540	156,2	657,5	501,3	155	5,433	653,9	2753	2099
156	5,686	157,2	657,7	500,5	156	5,576	658,2	2754	2096
157	5,836	158,2	657,9	499,7	157	5,723	662,5	2755	2092
158	5,988	159,3	658,2	498,9	158	5,872	666,9	2756	2089
159	6,144	160,3	658,4	498,1	159	6,024	671,2	2757	2086

## Окончание приложения 3.1

В системе: кг/см <sup>2</sup> и ккал/кг					В системе СИ: бар и кДж/кг				
t, °C	P <sub>абс.</sub> , кг/см <sup>2</sup>	i', ккал/кг	i'', ккал/кг	г, ккал/кг	t, °C	P <sub>абс.</sub> , бар	i', кДж/кг	i'', кДж/кг	г, кДж/кг
160	6, 302	161,3	658,7	497,4	160	6,180	675,5	2758	2082
161	6, 464	162,4	659,0	496,6	161	6,339	679,9	2759	2079
162	6, 630	163,4	659,2	495,8	162	6,502	684,2	2760	2076
163	6, 798	164, 5	659,5	495,0	163	6,667	688,6	2761	2072
164	6, 970	165, 5	659,7	494,2	164	6,836	692,9	2762	2069
165	7, 146	166,5	660,0	493,5	165	7,008	697,3	2763	2066
166	7, 325	167,6	660,3	492,7	166	7,183	701,7	2764	2062
167	7, 507	168,6	660,5	491,9	167	7,362	706,1	2765	2059
168	7, 693	169,7	660,8	491,1	168	7,545	710,5	2767	2056
169	7, 883	170,7	661,0	490,3	169	7,731	714,8	2768	2053
170	8, 076	171,8	661,3	489,5	170	7,920	719,2	2769	2050
171	8, 274	172,8	661,5	488,7	171	8,114	723,5	2770	2046
172	8, 475	173,9	661,8	487,9	172	8,311	727,9	2771	2043
173	8, 679	174,9	662,0	487,1	173	8,511	732,3	2772	2040
174	8, 888	176,0	662,3	486,3	174	8,716	736,7	2773	2036
175	9, 101	177,0	662,4	485,4	175	8,925	741,1	2773	2032
176	9, 317	178,1	662,7	484,6	176	9,137	745,5	2774	2029
177	9, 538	179,1	662,9	483,8	177	9,354	749,9	2775	2025
178	9, 763	180,2	663,2	483,0	178	9,574	754,3	2776	2022
179	9, 992	181,2	663,4	482,2	179	9,799	758,7	2777	2018
180	10,225	182,3	663,6	481,3	180	10,027	763,1	2778	2015
181	10,462	183,3	663,7	480,4	181	10,260	767,5	2779	2011
182	10,703	184,4	663,9	479,5	182	10,497	771,9	2780	2008
183	10,950	185,4	664,0	478,6	183	10,738	776,3	2780	2004
184	11,201	186,5	664,3	477,8	184	10,984	780,7	2781	2000
185	11,456	187,6	664,6	477,0	185	11,234	785,2	2782	1997
186	11,715	188,6	664,7	476,1	186	11,488	789,6	2783	1993
187	11,979	189,7	664,9	475,2	187	11,747	794,0	2784	1990
188	12,248	190,7	665,0	474,3	188	12,011	798,5	2784	1986
189	12,522	191,8	665,2	473,4	189	12,280	803,0	2785	1982
190	12,800	192,9	665,5	472,6	190	12,553	807,5	2786	1979
191	13,083	193,9	665,6	471,7	191	12,830	811,9	2787	1975
192	13,371	195,0	665,8	470,8	192	13,112	816,4	2787	1971
193	13,664	196,1	666,0	469,9	193	13,400	820,9	2788	1967
194	13,962	197,2	666,2	469,0	194	13,692	825,4	2789	1964
195	14,265	198,2	666,3	468,1	195	13,989	829,9	2790	1960
196	14,573	199,3	666,5	467,2	196	14,291	834,4	2790	1956
197	14,886	200,4	666,7	466,3	197	14,598	838,9	2791	1952
198	15,204	201,4	666,8	465,4	198	14,910	843,4	2792	1949
199	15,528	202,5	667,0	464,5	199	15,228	847,9	2793	1945
200	15,857	203,6	667,1	463,5	200	15,551	852,4	2793	1941
201	16,192	204,7	667,2	462,5	201	15,879	856,9	2793	1936
202	16,532	205,7	667,3	461,5	202	16,212	861,5	2794	1932

Приложение 3.2

Состояние насыщения (по давлению)

В системе: кг/см <sup>2</sup> и ккал/кг					В системе СИ: бар и кДж/кг				
Р <sub>абс</sub> , кг/см <sup>2</sup>	t, °С	i', ккал/кг	i'', ккал/кг	г, ккал/кг	Р <sub>абс</sub> , бар	t, °С	i', кДж/к Г	i'', кДж/к Г	г, кДж/к Г
0,90	96,18	96,26	637,6	541,3	0,90	96,72	405,3	2670	2265
0,95	97,66	97,75	638,2	540,3	0,95	98,21	411,5	2673	2261
1,0	99,09	99,19	638,8	539,6	1,0	99,64	417,4	2675	2258
1,1	101,76	101,87	639,8	537,9	1,1	102,32	428,9	2679	2250
1,2	104,25	104,38	640,7	536,3	1,2	104,81	439,4	2683	2244
1,3	106,56	106,72	641,6	534,9	1,3	107,14	449,2	2687	2238
1,4	108,74	108,92	642,3	533,4	1,4	109,33	458,5	2690	2232
1,5	110,79	110,99	643,1	532,1	1,5	111,38	467,2	2693	2226
1,6	112,73	112,95	643,8	530,8	1,6	111,32	475,4	2696	2221
1,7	114,57	114,81	644,5	529,7	1,7	115,17	483,2	2699	2216
1,8	116,33	116,60	645,1	528,5	1,8	116,94	490,7	2702	2211
1,9	118,01	118,30	645,7	527,4	1,9	118,62	497,9	2704	2206
2,0	119,62	119,94	646,3	526,4	2,0	120,23	504,8	2707	2202
2,1	121,16	121,5	646,8	525,3	2,1	121,78	511,4	2709	2198
2,2	122,65	123,0	647,3	524,3	2,2	123,27	517,8	2711	2193
2,3	124,08	124,5	647,8	523,3	2,3	124,71	524,0	2713	2189
2,4	125,46	125,9	648,3	522,4	2,4	126,09	529,8	2715	2185
2,5	126,79	127,2	648,7	521,5	2,5	127,43	535,4	2717	2182
2,6	128,08	128,5	649,2	520,7	2,6	128,73	540,9	2719	2178
2,7	129,34	129,8	649,6	519,8	2,7	129,98	546,2	2721	2175
2,8	130,55	131,1	650,0	518,9	2,8	131,20	551,4	2722	2171
2,9	131,73	132,3	650,3	518,0	2,9	132,39	556,5	2724	2167
3,0	132,88	133,4	650,7	517,3	3,0	133,54	561,4	2725	2164
3,1	134,00	134,6	651,1	516,5	3,1	134,66	566,3	2727	2161
3,2	135,08	135,7	651,4	515,7	3,2	135,75	571,1	2728	2157
3,3	136,14	136,8	651,8	515,0	3,3	136,82	575,7	2730	2154
3,4	137,18	137,8	652,1	514,3	3,4	137,86	580,2	2731	2151
3,5	138,14	138,9	652,4	513,5	3,5	138,88	584,5	2732	2148
3,6	139,18	139,9	652,7	512,8	3,6	139,87	588,7	2734	2145
3,7	140,15	140,9	653,0	512,1	3,7	140,84	592,8	2735	2142
3,8	141,09	141,8	653,3	511,5	3,8	141,79	596,8	2736	2139
3,9	142,02	142,8	653,6	510,8	3,9	142,71	600,8	2737	2136
4,0	142,92	143,7	653,9	510,2	4,0	143,62	604,7	2738	2133
4,1	143,81	144,6	654,1	509,5	4,1	144,51	608,5	2740	2131
4,2	144,68	145,5	654,4	508,9	4,2	145,39	612,3	2741	2129
4,3	145,54	146,4	654,7	508,3	4,3	146,25	616,1	2742	2126
4,4	146,38	147,3	654,9	507,6	4,4	147,09	619,8	2743	2123
4,5	147,20	148,1	655,2	507,1	4,5	147,92	623,4	2744	2121
4,6	148,01	149,0	655,4	506,5	4,6	148,73	626,9	2745	2118
4,7	148,81	149,8	655,6	505,8	4,7	149,53	630,3	2746	2116
4,8	149,59	150,6	655,9	505,3	4,8	150,31	633,7	2747	2113

## Окончание приложения 3.2

В системе: кг/см <sup>2</sup> и ккал/кг					В системе СИ: бар и кДж/кг				
Р <sub>абс</sub> , кг/см <sup>2</sup>	t, °C	i', ккал/кг	i'', ккал/кг	г, ккал/кг	Р <sub>абс</sub> , бар	t, °C	i', кДж/кг	i'', кДж/кг	г, кДж/кг
4,9	150,36	151,4	656,1	504,7	4,9	151,08	636,9	2748	2111
5,0	151,11	152,1	656,3	504,2	5,0	151,84	640,1	2749	2109
5,2	152,59	153,7	656,7	503,0	5,2	153,32	646,5	2750	2104
5,4	154,02	155,1	657,1	502,0	5,4	154,76	652,7	2752	2099
5,6	155,41	156,6	657,5	500,9	5,6	156,16	658,8	2754	2095
5,8	156,76	158,0	657,9	499,9	5,8	157,52	664,7	2755	2090
6,0	158,08	159,3	658,3	498,9	6,0	158,84	670,5	2757	2086
6,2	159,36	160,7	658,6	497,9	6,2	160,12	676,0	2758	2082
6,4	160,61	162,0	659,0	497,0	6,4	161,37	681,5	2760	2078
6,6	161,82	163,2	659,3	496,1	6,6	162,59	686,9	2761	2074
6,8	163,01	164,5	659,6	495,1	6,8	163,79	692,1	2762	2070
7,0	164,17	165,7	659,9	494,2	7,0	164,96	697,2	2764	2067
7,2	165,31	166,9	660,2	493,3	7,2	166,10	702,2	2765	2063
7,4	166,42	168,0	660,4	492,4	7,4	167,21	707,1	2766	2059
7,6	167,51	169,2	660,7	491,5	7,6	168,30	711,8	2767	2055
7,8	168,57	170,3	661,0	490,7	7,8	169,37	716,4	2768	2052
8,0	169,61	171,4	661,2	489,8	8,0	170,42	720,9	2769	2048
8,2	170,63	172,4	661,4	489,0	8,2	171,44	725,4	2770	2045
8,4	171,63	173,4	661,7	488,3	8,4	172,44	729,8	2771	2041
8,6	172,61	174,5	661,9	487,4	8,6	173,43	734,2	2772	2038
8,8	173,58	175,5	662,1	486,6	8,8	174,40	738,6	2773	2034
9,0	174,53	176,5	662,3	485,8	9,0	175,35	742,8	2774	2031
9,2	175,46	177,5	662,5	485,0	9,2	176,29	746,9	2775	2028
9,4	176,38	178,5	662,7	484,2	9,4	177,21	750,9	2776	2025
9,6	177,28	179,4	662,9	483,5	9,6	178,12	754,8	2777	2022
9,8	178,16	180,3	663,1	482,8	9,8	179,01	758,8	2778	2019
10,0	179,04	181,3	663,3	482,1	10,0	179,88	762,7	2778	2015
10,5	181,16	183,5	663,7	480,2	10,5	182,00	772,1	2779	2007
11,0	183,20	185,7	664,1	478,4	11,0	184,05	781,1	2781	2000
11,5	185,17	187,7	664,5	476,8	11,5	186,04	789,8	2783	1993
12,0	187,08	189,8	664,9	475,1	12,0	187,95	798,3	2785	1987
12,5	188,92	191,7	665,3	473,6	12,5	189,80	806,5	2786	1980
13,0	190,71	193,6	665,6	472,0	13,0	191,60	814,5	2787	1973
13,5	192,45	195,5	665,9	470,4	13,5	193,34	822,3	2789	1967
14,0	194,13	197,3	666,2	468,9	14,0	195,04	830,0	2790	1960
14,5	195,77	199,1	666,4	467,4	14,5	196,68	837,4	2791	1954
15,0	197,36	200,7	666,7	465,9	15,0	198,28	844,6	2792	1947
15,5	198,91	202,4	666,9	464,5	15,5	199,84	851,5	2793	1941
16,0	200,43	204,0	667,1	463,1	16,0	201,36	858,3	2793	1935
16,5	201,91	205,6	667,3	461,7	16,5	202,85	865,0	2794	1929
17,0	203,35	207,2	667,5	460,3	17,0	204,30	871,6	2795	1923
17,5	204,76	208,7	667,7	459,0	17,5	205,72	878,1	2796	1918
18,0	206,14	210,2	667,8	457,6	18,0	207,10	884,4	2796	1912

Индивидуальные задания и исходные данные для расчёта материального и теплового баланса  
и оборудования периодической сульфатной варки

№ п/п	Наименование показателей	Источник информации	Номер задания и исходные данные				
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
1	Вид и марка целлюлозы	Соответствующий ГОСТ	НС-1	НС-2	НС-3	ЭК-1	ЭК-2
1.1	По ГОСТу		ГОСТ 11208-82			ГОСТ 12765-	
2	Степень делигнификации (жёсткость), п.е. (ед. Каппа)	Соответствующая ГОСТу	24	23	22	21	22
3	Вид древесины	[1, с. 65-67; табл. 11]	Сосна	Листвен-ница	Сосна	Сосна	Сосна
3.1	Объёмная условная плотность древесины (Z), кг а. с. д./пл. м <sup>3</sup>	Приложение 1; [2, с. 62-64]					
4	<b>Выход целлюлозы из древесины (В<sub>1</sub>), %</b>	[1, с. 106-107]	<b>47</b>	<b>46</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>45</b>
5	Влагосодержание щепы (W), %		40	42	35	38	42
6	Расход активной щёлочи на варку (А) (в ед. Na <sub>2</sub> O), % от веса а. с. древесины	[1, с. 52-55; рис. 17; с. 94-95; табл. 18]	17	17	17,5	18	17,5
7	Концентрация активной щёлочи в белом щёлоке (в ед. Na <sub>2</sub> O) – (С <sub>А</sub> ), г/л		100	110	112	115	110
8	Степень сульфидности белого щёлока (С <sub>у</sub> ), %	[1, с. 57-59]	30	25	27	27	28
9	Степень каустизации белого щёлока (К), %	[1, с. 451-452; с. 456-460]	82	84	86	85	84
10	Степень восстановления белого щёлока (Вс), %	[1, с. 387-382]	94	92	93	92	93

## Продолжение приложения 4

№ п/п	Наименование показателей	Источник информации	Номер задания и исходные данные				
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
11	Объёмная плотность загрузки варочного котла, (X), пл. м <sup>3</sup> древесины/м <sup>3</sup> варочного котла	[1, с. 93-94]					
12	Гидромодуль варки (ГМ)	[1, с. 68-69; с. 135-136]	4:1	4,5:1	4,2:1	4,5:1	4,2:1
13	Концентрация чёрного щёлока, заливаемого на варку (C <sub>2</sub> ), % сухих веществ	[1, с. 317-321; рис. 130; табл. 50]	13	14	13,8	13	12,6
14	Плотность чёрного щёлока (ρ), т/м <sup>3</sup>	Приложение 2					
15	Доля органической части в сухом остатке чёрного щёлока (Орг.), %	[1, с. 372-373; табл. 55]	70	70	70	70	70
16	Доля минеральной части в сухом остатке чёрного щёлока (М), %	[1, с. 372-373; табл. 55]	30	30	30	30	30
17	Температура варки (t <sub>кон.</sub> ), °С	Приложение 3; [1, с. 49-52]	172	171	170	169	170
18	Давление в варочном котле после конечной сдувки, (P <sub>кон.сд.</sub> ), кг/см <sup>2</sup>	Приложения 3; 3.2	6,0	5,5	5,1	4,8	5,2
19	Оборот котла (Σ τ), час-мин	[1, с. 97-103; с. 106-107]	5ч- 10мин	5ч- 15мин	5ч- 50мин	6ч- 30мин	6ч- 15мин
20	Объём варочного котла, м <sup>3</sup>	[1, с. 80-82; табл. 15]					
21	Производительность варочного цеха (Q), тонн в. с. целлюлозы/сутки		400	440	600	220	300

Продолжение заданий (№ 6 – 16 и № 17 – 27) и исходных данных — на стр. 61-62

№ п/п показателей	Номера заданий и исходные данные										
	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11	№ 12	№ 13	№ 14	№ 15	№ 16
1	Э-1	Э-2	Белёная хвойная		Белёная лиственная		НС-1	НС-2	НС-3	Белёная хвойная	
1.1	ГОСТ 5186-82		ГОСТ 9571-89		ГОСТ 28172-89		ГОСТ 11208-82			ГОСТ 9571-89	
2	25	28	25	27	23	22	24	23	22	25	26
3	Сосна	Сосна	Листвен-ница	Сосна	Берёза	Осина	Сосна	Сосна	Листвен-ница	Листвен-ница	Сосна
3.1											
<b>4</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>50</b>	<b>52</b>	<b>47</b>	<b>47</b>	<b>46</b>	<b>44,7</b>	<b>45,3</b>
5	38	39	40	35	35	40	40	38	40	39	39
6	17	17	18	17,5	16,5	16	17,2	17,0	18,0	18,2	18,0
7	95	110	110	112	100	115	120	110	120	115	112
8	25	24	26	24	27	26	28	27	25	25	24
9	84	84	83	84	82	83	81	82	84	83	84
10	93	90	92	93	94	94	94	93	92	93	92
11											
12	4:1	4:1	5:1	4:1	4,5:1	4:1	4:1	4,2:1	4,5:1	5:1	4,5:1
13	13,4	13,2	15	14	13	12	12,8	13,0	13,8	14,6	14,2
14											
15	70	70	70	70	65	65	70	70	70	70	65
16	30	30	30	30	35	35	30	30	30	30	35
<b>17</b>	<b>170</b>	<b>171</b>	<b>169</b>	<b>170</b>	<b>168</b>	<b>167</b>	<b>171</b>	<b>170</b>	<b>170</b>	<b>170</b>	<b>171</b>
18	5,5	5,8	5,2	5,2	4,8	4,8	5,2	5,1	5,2	4,9	5,3
19	6ч	5ч-45'	6ч-30'	6ч-30'	6ч	5ч-50'	5ч-20'	5ч-40'	5ч-50'	6ч-30'	6ч-15'
20											
21	250	350	600	440	600	500	480	500	440	360	400

№ п/п показателей	Номера заданий и исходные данные										
	№ 17	№ 18	№ 19	№ 20	№ 21	№ 22	№ 23	№ 24	№ 25	№ 26	№ 27
1	Белёная лиственная		ЭК-1	ЭК-2	Э-1	Э-2	Белёная хвойная		НС-1	НС-2	НС-3
1.1	ГОСТ 28172-89		ГОСТ 12765-		ГОСТ 5186-82		ГОСТ 9571-89		ГОСТ 11208-82		
2	24	22	21	22	26	27	24	25	25	24	23
3	Берёза	Осина	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна	Листвен -ница	Сосна	Листвен -ница	Листвен -ница
3.1											
<b>4</b>	<b>50,7</b>	<b>52,4</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>45</b>	<b>44,5</b>	<b>47,2</b>	<b>46,3</b>	<b>46</b>
5	40	42	39	41	40	43	36	39	37	38	38
6	16,3	15,8	17,7	17,6	17,0	17,0	18,2	18,2	17,0	17,2	17,4
7	100	110	112	115	95	105	120	110	115	112	95
8	25	23	25	27	28	26	28	26	26	28	30
9	84	84	83	82	81	83	82	84	83	82	82
10	92	92	92	94	94	93	94	92	92	93	94
11											
12	4,5:1	4,2:1	4,5:1	4,2:1	4:1	4:1	4,2:1	5:1	4:1	4,7:1	4,7:1
13	12,8	12,6	13,8	14,0	13,2	12,6	14,0	14,4	13,2	13,6	13,3
14											
15	65	65	70	70	70	70	67	67	70	70	70
16	35	35	30	30	30	30	33	33	30	30	30
<b>17</b>	<b>168</b>	<b>166</b>	<b>172</b>	<b>171</b>	<b>170</b>	<b>172</b>	<b>172</b>	<b>171</b>	<b>170</b>	<b>171</b>	<b>172</b>
18	4,9	4,8	5,3	5,2	4,9	5,3	5,2	5,1	5,2	5,2	5,4
19	6 ч	5 ч-50'	5ч-40'	5ч-50'	5ч-30'	5ч-10'	6ч-50'	6ч-50'	5ч-30'	5ч-45'	5ч-30'
20											
21	440	480	440	320	280	320	400	420	400	500	460



## Оглавление

Введение.....	4
Варка сульфатной целлюлозы.....	5
Исходные данные для расчёта материального баланса .....	18
1. Загрузка щепы и закачка щелоков.....	21
2. Заварка.....	24
3. Варка.....	25
4. Конечная сдувка .....	27
5. Выдувка массы .....	32
6. Тепловой баланс периодической сульфатной варки .....	37
7. Расчёт и подбор оборудования варочного отдела .....	42
Библиографический список.....	52
Приложения .....	53
Приложение 1 .....	53
Приложение 2 .....	55
Приложение 3 .....	56
Приложение 3.1 .....	56
Приложение 3.2 .....	59
Приложение 4 .....	61

**Юрий Сергеевич Иванов  
Андрей Борисович Никандров  
Антон Геннадьевич Кузнецов**

## **МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ**

**Учебное пособие**

Редактор и корректор В. А. Басова  
Техн. редактор Л. Я. Титова

Темплан 2018 г., поз 33

---

Подп. к печати 10.05.2018. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.

Печать офсетная. 5,0 уч.-изд. л.; 5,0 усл.-печ. л. Тираж 50 экз. Изд. № 33.

Цена «С». Заказ

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095, Санкт-Петербург,  
ул. Ивана Черных, 4.