

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
ТТДГД

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В. А. Кулагин
« ____ » _____ 2016г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА
140100.62 – Теплоэнергетика и теплотехника
Использование вторичных энергоресурсов для сушки древесины

Руководитель	_____	доцент кафедры ТТДГД.	Е. Б. Истягина
Выпускник	_____		А. Р. Монгуш
Нормоконтролер	_____		Е. Б. Истягина

Красноярск 2016

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
ТТДГД

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В. А. Кулагин
« ____ » _____ 2016 г

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Студенту Монгуш Аясу Романовичу

Группа ФЭ 12-02Б Направление (специальность) 140100.62

Теплоэнергетика и теплотехника

Тема выпускной квалификационной работы: «Использование вторичных энергоресурсов для сушки древесины»

Утверждена приказом по университету № 6323/с от 12 май 2016 г.

Руководитель ВКР Е. Б. Истягина, доцент, кафедра

Теплотехники и гидрогазодинамики

Исходные данные для ВКР:

Внутренние размеры камеры: 6,85×2,92×2,64

В камере располагаются 15 штабелей

Размеры штабеля: 6×1×1,10

Производительность сушильного цеха 1800 м³ условного материала в год.

Материал: сосновые обрезные доски размером 6×0,035×0,095

Начальная влажность материала: $\omega_n = 65\%$

Конечная влажность материала: $\omega_k = 12\%$

Режим сушки: $t=65^\circ\text{C}$, $\varphi = 31\%$

Продолжительность сушки: $\tau=7$ суток.

Теплоноситель: вода

Согласно заданию, параметры сухого воздуха на сухом конце камеры: $t=65^\circ\text{C}$,

$\varphi_1=31\%$. Определяем по Id-диаграмме (приложение 1): $I_1=270$ ккал/кг, $d_1=382$

г/кг, $\rho_1=0,78$ кг/м³, $v_1=1,77$ м³/кг; для сырого конца устанавливаем $\varphi_2=90\%$.

Перечень разделов БР:

Введение

1 Сушка

2 Технология сушки

3 Оборудование сушильных камер

4 Тепловой расчет сушильной камеры

5 Энергосбережение при проведении процесса сушки

Перечень графического материала:

- 1 Кривые распределения влажности
- 2 Схема газовой радиационной сушилки
- 3 Принципиальная схема вакуумной сушики индукционным способом трансформаторов напряжением 110—500 кВ
- 4 Схема конвективных сушилок
- 5 Конструкция сушильной камеры древесины с верхним расположением вентиляторов.
- 6 Укладка пиломатериала в ряду пакета или штабеля
- 7 Схема теплового блока
- 8 Схема действительного процесса сушки в камере на Id-диаграмме

Руководитель ВКР _____ Е. Б. Истягина

Задание принял к исполнению _____ А. Р. Монгуш

« ____ » _____ 2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Сушка.....	4
1.1 Теория и способы сушки.....	4
1.2 Конвективная сушка.....	10
2 Технология сушки.....	14
2.1 Цели, задачи, терминология, используемая в процессе сушки древесины.....	14
2.2 Рекомендации по камерной сушке материалов.....	15
2.3 Влияние режима сушки древесины на ее физические свойства.....	20
2.4 Проведение процессов сушки древесины.....	23
2.5 Дефекты сушки пиломатериалов и их предупреждение.....	25
3 Оборудование сушильных камер.....	28
3.1 Промышленное оборудование.....	28
3.2 Использование вторичных отходов.....	33
4 Тепловой расчет сушильной камеры.....	34
4.1 Основные расчетные формулы.....	34
4.2 Расчетная часть.....	36
5 Энергосбережение при проведении процесса сушки.....	46
5.1 Принципы энергосбережения.....	46
5.2 Типы рекуператоров.....	49
Заключение.....	53
Список использованной литературы.....	54

ВВЕДЕНИЕ

Дерево является уникальным в своем роде, ни с чем несравнимым материалом. Оно остается популярным как в строительной, так и в мебельной индустрии. Важным фактором является то, что дерево очень распространенный материал для нашего региона и традиционно используемый. Площадь лесного фонда Красноярского края составляет 168,1 миллионов гектаров. Леса покрывают 71,02 % территории края. Запасы промышленной древесины оцениваются в 14,4 миллиардов м³, что составляет 18 % общероссийских запасов древесины. Более половины лесов края приходится на лиственницу, около 17 % на ель и пихту, 12 % на сосну обыкновенную и более 9 % — на сибирский кедр. Леса края на 88 % состоят из хвойных пород. В нашем крае сконцентрировано 10 % российских запасов древесины.

Растущее дерево, как и всякий живой организм, содержит в себе большое количество влаги. В срубленном дереве влага играет отрицательную роль, ухудшая технические свойства древесного материала. Влажная древесина подвержена загниванию, вызываемому разными грибами, разрушающими ее структуру.

При изготовлении большого количества изделий влага является серьезной помехой и должна быть удалена из древесины предварительно, до употребления ее в дело. С этой целью древесину сушат до определенной влажности, соответствующей условиям эксплуатации сооружения или изделия. Например, древесина для изготовления мебели должна высушиваться до низкой влажности (6÷10%), а доски для обшивки дома достаточно сушить до 16÷18%.

Сушка является обязательной и при этом самой длительной и дорогой операцией в технологическом процессе каждого деревообрабатывающего производства. Хорошо проведенная сушка служит базой отличного качества изделий из древесины.

1 Сушка

1.1 Теория и способы сушки

Сушка - высушивание, удаление жидкости (обычно влаги) из твёрдых, жидких и газообразных тел. При сушке удаляется, как правило, влага, связанная с материалом физико-химически (адсорбционно и осмотически) и механически (влага макро и микрокапилляров); химически связанная влага не может быть удалена путём сушки. Цель сушки — сохранение физико-химических свойств материалов, обеспечение во многих случаях сохранности материалов на продолжительный период, а также исключение перевозки балласта. В технике наиболее распространена сушка влажных твёрдых материалов при их подготовке к переработке, использованию или хранению. Сушка этих материалов — процесс, сопровождающийся тепло и массообменом между сушильным агентом (воздух, топочные газы и др.) и влагой высушиваемого материала.

Процессы сушки принято анализировать по кривым изменения во времени средней влажности древесины (кривые сушки), изменения во времени отношений интервалов средней влажности и времени (кривые скорости сушки), ее температуры (температурные кривые) и кривым распределения влаги по толщине сортимента на различных этапах процесса (рисунок 1.1).

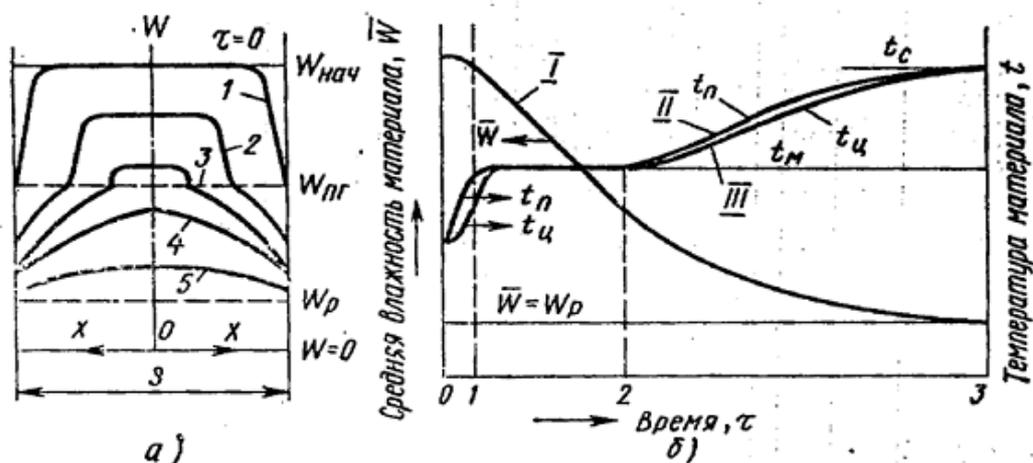
Процесс сушки пиломатериалов протекает неравномерно и может быть разделен на четыре этапа.

Первый этап – прогрев древесины, во время которого влага из нее не убывает. При этом влага, находящаяся в наружных зонах, нагревается сильнее, чем во внутренних, и это вызывает движение ее снаружи внутрь. Если при этом мы не замедлим влагоотдачу с поверхности, то наружные слои пересохнут и могут растрескаться. Поэтому прогревать штабель пиломатериалов нужно обязательно при высокой относительной влажности агента сушки, чтобы свести влагоотдачу к нулю.

Второй этап – сушка древесины от высокой начальной влажности W_n до так называемой критической $W_{кр}$, несколько превышающей значение влажности предела гигроскопичности (предела насыщения волокон). $W_{кр} \approx W_{п.г.} = 30\%$. На этом этапе из древесины удаляется вся свободная влага и процесс сушки протекает наиболее интенсивно.

Третий этап – сушка от критической влажности до заданной конечной. На этом этапе из древесины удаляется связанная влага. Процесс идет более замедленно, чем на втором этапе.

Четвертый этап – остывание пиломатериалов. В некоторых случаях ему предшествует кондиционирование.



Кривые распределения влажности по толщине пластины (а), кривая сушки и температурные кривые (б) низкотемпературного процесса: 1,2,3,4,5 – кривые распределения влажности по толщине пластины на различных этапах процесса; I – кривая сушки, II – температурная кривая на поверхности пластины, III – температурная кривая в центре пластины

Рисунок 1.1 - Кривые распределения влажности

Выбор условий сушки (температура, давление, скорость движения сушильного агента и др.) зависит от физико-химических свойств высушиваемого материала: склонности к сокращению в объеме (дерево),

образованию плотной корки на поверхности (некоторые соли), повышению хрупкости, термостойкости (бумага) и др.

По способу подвода тепла сушилки бывают: конвективные (высушиваемый материал омывается потоком предварительно нагретого сушильного агента); контактные (непосредственный контакт высушиваемого материала с нагреваемой поверхностью); сублимационные (удаление влаги в замороженном состоянии под вакуумом); высокочастотные (удаление влаги под воздействием электрического поля высокой частоты); радиационные (высушивание под действием инфракрасного излучения).

Конвективная газопаровая сушка называется камерной. Это основной промышленный способ сушки пиломатериалов, осуществляемый в лесосушильных камерах различных конструкций, куда пиломатериалы загружают штабелями. Сушка происходит в газообразной среде (воздухе, топочных газах, перегретом паре), которая путем конвекции передает теплоту древесине. Для нагревания и циркуляции сушильного агента камеры снабжают нагревательными и циркуляционными устройствами.

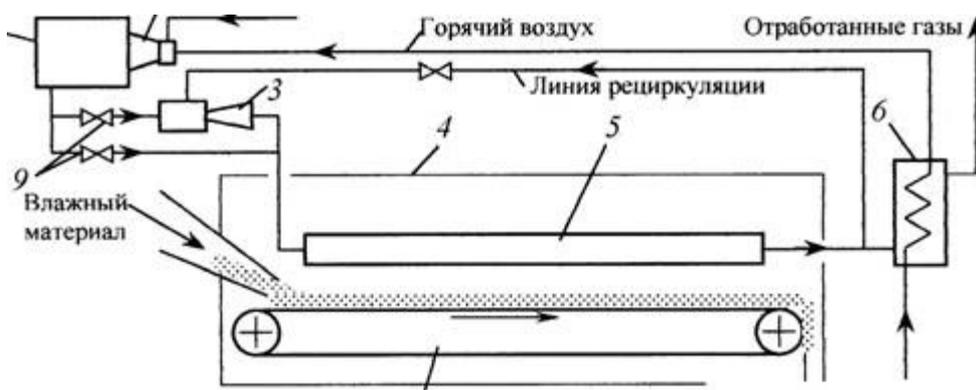
При камерной сушке сроки просыхания пиломатериалов сравнительно небольшие (от десятков часов до нескольких суток), древесина просыхает до любой заданной конечной влажности при требуемом качестве, процесс сушки поддается надежному регулированию.

Атмосферная сушка — второй по значению и распространению на лесопильных предприятиях способ промышленной сушки пиломатериалов, осуществляемый в штабелях, размещенных на специальной открытой территории (складах), омываемых атмосферным воздухом без подогрева. Преимущество атмосферной сушки—сравнительно низкая себестоимость. Недостатки: сезонность (зимой сушка практически прекращается); большая продолжительность; высокая конечная влажность. Атмосферную сушку применяют, главным образом, для сушки пиломатериалов на лесопильных предприятиях до транспортной влажности и на некоторых деревообрабатывающих предприятиях для подсушки и выравнивания

начальной влажности пиломатериалов перед камерной сушкой.

Кондуктивная (контактная) сушка осуществляется путем передачи тепла материалу посредством теплопроводности при контакте с нагретыми поверхностями. Применяется в небольших объемах для сушки тонких древесных материалов - шпона, фанера.

Радиационная сушка (рисунок 1.2) происходит при передаче тепла материалу излучением от нагретых тел. Этот способ для пиломатериалов не применяется, а используется в технологии отделки сушки лакокрасочных покрытий. Воздух или его смесь с топочными газами в радиационных сушилках не является сушильным агентом, так как его роль сводится к вентиляции сушильной камеры от удаляемых из материала паров влаги.



1-топка; 2-горелка; 3-эжектор; 4-сушильная камера; 5-излучающая панель; 6-воздухоподогреватель; 7-вентилятор; 8-транспортер; 9-шиберы

Рисунок 1.2 - Схема газовой радиационной сушилки

Ротационная сушка основана на использовании центробежного эффекта, за счет которого свободная влага удаляется из древесины при вращении ее на центрифугах. Механическое удаление свободной влаги достигается при центростремительном ускорении не менее 100-150g (где g – ускорение свободного падения). Такое ускорение вследствие трудности балансировки центрифуги со штабелем пока не достигнуто, ведутся лишь опытные разработки. Хотя ротационные сушилки экономичны и обеспечивают высокое

качество сушки, промышленного значения для пиломатериалов пока ротационный способ сушки не имеет.

Вакуумная сушка (рисунок 1.3) при пониженном давлении в специальных геометрических камерах из-за сложности оборудования и невозможности получения низкой конечной влажности древесины самостоятельного значения не получила. Применяется в комбинации с другими методами сушки и как вспомогательная операция при подготовке древесины к пропитке.

При диэлектрической сушке в электромагнитном поле токов высокой частоты древесина нагревается за счет диэлектрических потерь. Благодаря равномерному нагреву по всему объему, возникновению положительного градиента температуры и избыточного давления внутри древесины продолжительность диэлектрической сушки в десятки раз меньше конвективной. Из-за сложности оборудования, большего расхода электроэнергии и недостаточно высокого качества сушки этот метод не находит широкого применения.

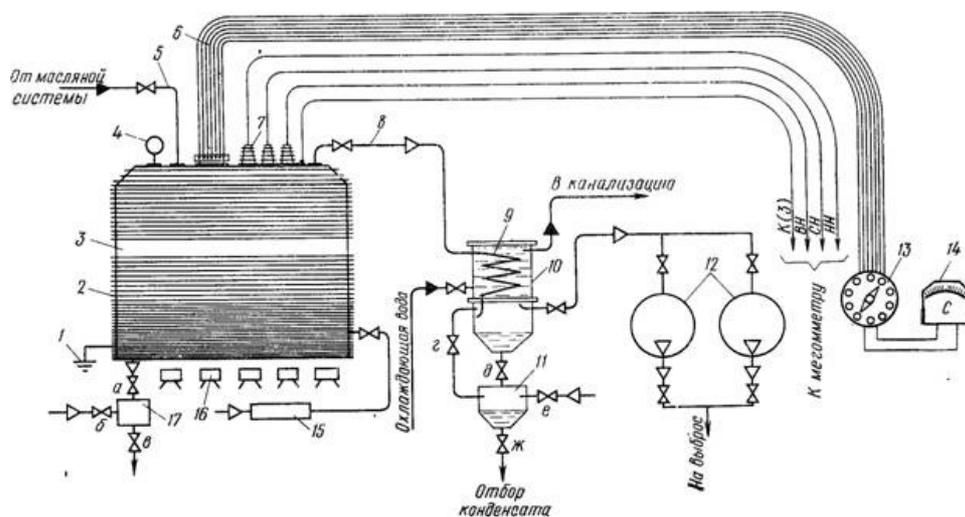


Рисунок 1.3 - Принципиальная схема вакуумной сушки индукционным способом трансформаторов напряжением 110—500 кВ

Более эффективным является применение комбинированных способов сушки: камерной и вакуумно-диэлектрической. Для массовой сушки

применение этих способов неэкономично, но в отдельных конкретных случаях, особенно при сушке дорогих, ответственных пиломатериалов и заготовок из трудносохнущих пород древесины эти способы могут быть вполне эффективны и применение их целесообразно.

При комбинированной камерно-диэлектрической сушке к штабелю, загруженному в камеру, оборудованную тепловым и вентиляторным устройством, подводят высокочастотную энергию от специального генератора ТВЧ через электроды, расположенные около штабеля. Расход тепла на сушку при этом в основном компенсируется тепловой энергией пара, подаваемого в калориферы, а высокочастотная энергия подается для создания положительного перепада температур по сечению материала. Этот перепад в зависимости от характеристики материала и жесткости заданного режима составляет от 2 до 5 °С. Качество камерно-диэлектрической сушки пиломатериалов высокое, так как сушка ведется с небольшим перепадом влажности по толщине материала. Применяется главным образом для трудносохнущих лиственных пород древесины.

В последние годы исследуется и экспериментально проверяется еще один способ сушки с использованием энергии ТВЧ: вакуумно-диэлектрический. При этом способе используются преимущества вакуумной и диэлектрической сушки. За счет нагрева древесины в поле ТВЧ при пониженном давлении кипение воды в древесине достигается при небольших температурах древесины, что способствует сохранению ее качества. При вакуумно-диэлектрической сушке влага в древесине перемещается всеми основными движущими силами влагопереноса (градиентов влагосодержания, температуры, избыточного давления), что сокращает продолжительность сушки.

При вакуумно-диэлектрической сушке штабель пиломатериалов помещают в автоклав или геометрическую камеру, где вакуумным насосом создается пониженное давление среды. Чем ниже давление среды, тем ниже температура древесины при сушке. Расход тепла на сушку обеспечивается

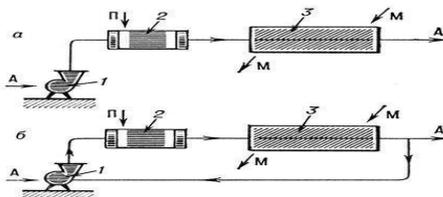
подводом высокочастотной энергии к древесине.

Комбинированная вакуумно-диэлектрическая сушка дешевле диэлектрической, обеспечивает хорошее качество сушки и может применяться для твердых лиственных пород древесины, а также в тех случаях, когда по местным условиям электрическое теплоснабжение достаточно дешево.

Широкое промышленное применение получили конвективные сушилки различных конструкций (камерные, барабанные, пневматические, с кипящим слоем, распылительные и прочие). В основном варианте конвективной сушилки сушильный агент, предварительно нагретый в калорифере до максимально допустимой температуры, движется в сушилке, непосредственно соприкасаясь с высушиваемым материалом (пищевыми продуктами, медицинскими препаратами, химическими соединениями и др). Отличительная особенность этого варианта – однократный нагрев и однократное использование сушильного агента

1.2 Конвективная сушка

Большое применение, как в России так и за рубежом получили сушильные камеры конвективного типа (рисунок 1.4). Конвективная технология сушки древесины позволяет получать качественный пиломатериал с необходимым коэффициентом влажности. Современные сушильные камеры оснащены автоматикой, позволяющей управлять и контролировать процесс сушки дистанционно.



а – основной вариант, б – с рециркуляцией части отработанного воздуха; А - сушильный агент, П – греющий пар, М – высушиваемый материал, 1 - вентилятор, 2 - калорифер, 3 - сушильная камера

Рисунок 1.4 - Схема конвективных сушилок

Циркуляция воздуха при камерной сушке древесины осуществляется с помощью вентиляторов, воздух проходит поперек штабеля. Вентиляторный отсек отгорожен от штабелей пиломатериала фальшпотоком и имеет перегородку, предназначенную для исключения «коротких замыканий» воздушного потока.

Одноштабельные сушильные камеры пиломатериалов допускают использование нереверсивных вентиляторов, при двух и более штабелях вентиляторы должны быть реверсивными.

Если электродвигатель вентилятора находится внутри сушильной камеры, он должен быть выполнен во влагозащищенном исполнении и иметь класс нагревостойкости «Н» (до 100 градусов), электродвигатель не удовлетворяющий этим требованиям, должен быть вынесен за пределы камеры.

Сушильные камеры древесины должны иметь конструкцию, обеспечивающую прохождение воздуха только через штабель пиломатериалов. Свободные проходы снижают поток воздуха через штабель (следовательно, сушка древесины идет медленнее) и делают его неравномерным, что увеличивает неравномерность влажности высушенных пиломатериалов.

Свободный проход воздуха по бокам, сверху, снизу штабеля должен быть перекрыт шторами, порогами и прочим. Боковые шторы рекомендуется установить таким образом, чтобы они перекрывали штабель на 10-15 сантиметров от торцов, это уменьшит растрескивание торцов. Верхние шторы в сушильной камере желательно сделать подвижными, так как сушка древесины приводит к уменьшению высоты штабеля пиломатериала.

Для равномерной сушки древесины по высоте штабеля расстояние от стенки сушильной камеры до штабеля пиломатериала должно быть не менее четверти высоты штабеля (рисунок 1.5), иначе необходимо обеспечить сужение воздушного канала сверху вниз.

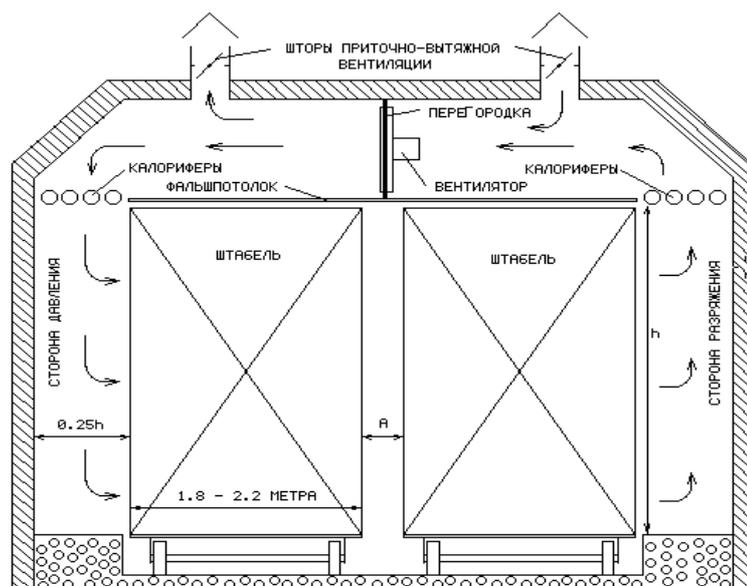


Рисунок 1.5 - Конструкция сушильной камеры древесины с верхним расположением вентиляторов.

Конвективные сушильные камеры древесины обогреваются калориферами, мощность калориферов определяется из расчета 3 - 4 кВт на куб условного пиломатериала. Не рекомендуется применять электрические калориферы: сушка древесины при этом будет иметь большую себестоимость. Наверное, для многих, лучшим вариантом будет использование котла, работающего на отходах деревообработки. Желательно чтобы воздух, поступающий в конвективные сушильные камеры при вентилировании, до попадания в штабель проходил через калориферы. Поэтому при наличии реверса вентиляторов калориферы обычно располагают в два ряда, как показано на рисунке 1.5. Если калориферы расположены в один ряд, а вентиляторы реверсивные, то калориферы должны находиться между воздуховодами вентиляции со стороны давления и стороны разрежения. Этот вариант менее экономичен. По рекомендуемым (мягким) для хвойных пород режимам, сушка древесины на последних стадиях может проходить при температуре до 75°C , внешняя температура, если сушильные камеры установлены вне помещения,

может достигать минус 40°C. Итого перепад температур 115°C. При плохой теплоизоляции на стенах, полу и потолке сушильной камеры может конденсироваться влага, что не позволит выдержать заданную по режиму влажность воздуха на начальных стадиях сушки древесины. По возможности, сушильные камеры нужно устанавливать в помещении, это снизит возможность растрескивания древесины при выгрузке из-за резкого перепада температур.

На начальных стадиях сушка древесины проводится при высокой влажности, поэтому влажный воздух из сушильной камеры должен удаляться тогда, когда это требуется по режиму. При плохой герметичности невозможно выдержать заданную влажность воздуха. Использование системы увлажнения не помогает: даже если в сушильную камеру подается пар, значительная часть его выпадает в виде конденсата из-за соприкосновения с холодным воздухом. Следовательно: сушильные камеры древесины должны быть герметичны, не иметь щелей, на воротах должны быть установлены уплотняющие прокладки. Особенно часто плохую герметичность имеют самодельные сушильные камеры. В промышленных камерах ухудшение герметичности обычно происходит из-за неплотного закрывания ворот вследствие небрежной их регулировки при монтаже.

При сушке древесины, которая после распиловки пролежала 2 - 3 дня, время сушки может растянуться на сутки и более, что нежелательно. Таким образом, система увлажнения при сушке пиломатериалов все-таки нужна. Для увлажнения используют пар или мелкораспыленную (капли висят в воздухе) с помощью форсунок воду. При этом необходимо контролировать, чтобы при распылении вода не попадала на термометр и датчик влажности воздуха. В результате автоматика может получать ложную информацию о параметрах климата.

Прежде чем древесина попадет на продажу, ей необходимо пройти несколько подготовительных этапов, одним из которых является сушка.

2 Технология сушки

2.1 Цели, задачи, терминология, используемая в процессе сушки древесины

Сушка древесины - процесс удаления влаги из древесины до определенного процента влажности.

Цель сушки: превращение из природного сырья древесины в промышленный материал, с улучшенными биологическими и физико-механическими свойствами.

Задачи сушки древесины следующие: предупреждение изменения линейных размеров древесины, так называемая усушка древесины, которая наблюдается при изменении количества связанной воды (т.е. при снижении влажности до 30%). Считается, что пиломатериалы хвойных пород при сушке от свежераспиленного состояния ($W > 30\%$) до транспортной влажности ($W = 20...22\%$) усыхают на 3%. Полная объемная сушка составляет 12...15%.

Процесс сушки древесины включает следующие процессы:

- Влагообмен - испарение влаги из древесины в окружающую среду.
- Влагоперенос - перемещение влаги внутри древесины.

Для сушки необходимо, чтобы происходили оба процесса. Влага от внутренних, сердцевинных слоев должна идти к поверхности (влагоперенос) и удаляться с поверхности (влагообмен). При этом важно, чтобы процессы влагообмена и влагопереноса были бы по интенсивности одинаковыми. Если количество воды, удаляемой с поверхности, будет больше, чем G внутренних слоев, то и усыхание поверхностных слоев будут больше. В результате будет создаваться напряжение между внутренним и внешними слоями. Причем это напряжение будет тем больше, чем больше разница между влажностью сердцевины и поверхности древесины. Напряжения могут приводить к деформациям в древесине и даже к трещинам и разрушениям.

Влагоперенос внутри древесины происходит под действием различных движущих сил:

- градиент влажности - перемещения влаги (при ее неравномерном распределении в древесине) в направлении понижающей влажности (влагопроводность);

- градиент температуры - перемещение влаги (при неравномерном распределении в древесине температуры) в направлении понижающей температуры (термовлагопроводность);

- перепад давления - перемещение влаги (при избыточном давлении внутри древесины) в направлении понижающего давления.

В любом процессе сушки древесины, перечисленные процессы действуют совместно, но сравнительная эффективность и степень воздействия отдельных видов влагопереноса зависит от вида и способа сушки. Во всех случаях, при искусственной сушке древесины перед конструкторами сушильного оборудования стоят три главных задачи:

1. Обеспечить качество сушки, т.е. минимизировать брак от деформаций и трещин.
2. Уменьшить время сушки насколько это возможно.
3. Сократить потребление энергии.

2.2 Рекомендации по камерной сушке пиломатериалов

Технология камерной сушки включает в себя подготовку штабеля сырого и хранение высушенного материала, проведение прогрева, кондиционирования и непосредственно сушки древесины.

В настоящее время существует достаточное количество режимов сушки древесины разных пород. Они отличаются уровнем температурно-влажностных параметров среды и числом изменений этих параметров на протяжении процесса, т.е. количеством ступеней. Общим является принцип построения режимов, основанный на безопасном для целостности древесины, постепенном повышении температуры и снижении влажности агента сушки.

Режимы разработаны и могут непосредственно применяться в "идеальной камере". В реальных камерах необходима доработка, привязка режимов с

учетом конкретных конструктивных особенностей. Так один и тот же режим в разных камерах может привести к ускоренной сушке, приводящей к браку, или к замедленной с переувлажнением материала и завышенным расходом теплоносителя. Поэтому основной задачей технолога является подбор оптимального режима индивидуально для каждой камеры.

При выборе режима сушки необходимо исходить из рационального сочетания следующих факторов: требуемого качества высушиваемого материала, определяемого нормами требований к качеству сушки; категории режимов сушки, обеспечивающей необходимое качество сушки при заданной продолжительности процесса, и конструкции камеры, способной высушивать материал, по определенной категории качества не превышая режимную продолжительность. Помимо технологических особенностей использования того или иного режима следует учитывать и экономические аспекты - рентабельность применения режимов разной интенсивности.

На равномерность сушки и сохранение правильной формы досок после сушки большое влияние оказывает качество формирования штабелей (пакетов). Деформирование высушиваемых пиломатериалов - это результат недостаточного их зажатия, т.е. неправильной укладки в штабель.

При камерной сушке используются штабеля двух типов: пакетный, формируемый из нескольких (2.4) сушильных пакетов, и цельный, собираемый целиком на месте его формирования.

Штабель (рисунок 2.1) должен состоять из пиломатериалов одной породы и толщины.

Подштабельное основание должно быть прочным, жестким, а верх его - горизонтальным. Длина основания должна равняться длине штабеля. Основанием штабеля наиболее часто служат специальные рельсовые вагонетки, собранные из треков. Трек представляет собой двухколесную тележку, установленную на один рельс. Треки соединяются между собой брусками сечением 100x100 мм, устанавливаемых в соответствующие пазы на треках. Длина брусков должна равняться ширине штабеля.

Форма поперечного сечения пакетов и штабелей должна быть прямоугольной, а торцы их выровнены по вертикали.

Разные по длине доски укладывают в разбежку, причем самые длинные - по краям. Такая укладка предохраняет концы досок от коробления. Стыкуемые доски (длина которых меньше половины длины штабеля) располагают не менее чем на двух прокладках, при этом внешние торцы выравнивают по торцам штабеля.

Если доски имеют разную ширину, то узкие укладывают в середину, а широкие - по краям пакета или штабеля. Если по ширине пакета или штабеля целое количество досок не размещается, то зазор оставляют по середине ширины штабеля.

Недогрузка штабеля по высоте недопустима, так как за счет больших утечек сушильного агента через пространство над штабелем резко снижается скорость циркуляции в самом штабеле. Это приводит к увеличению сроков сушки и в некоторой степени к неравномерному просыханию материала. Не обрезные доски укладывают комлями в разные стороны.

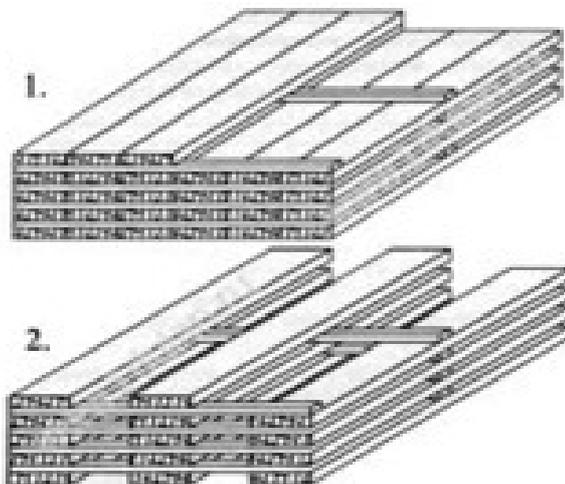


Рисунок 2.1 - Укладка пиломатериала в ряду пакета или штабеля

В зависимости от характера циркуляции агента сушки через штабель пиломатериалы укладывают:

1. сплошными рядами без промежутков (шпаций) между досками для камер с горизонтальной циркуляцией поперек штабелей (рисунок 2.2а);

2. с промежутками (шпациями) между досками для камер с горизонтальной циркуляцией вдоль штабелей и с вертикальной, в том числе естественной циркуляцией (рис. 2.2б).



2.2а - без шпаций; 2.2б - со шпациями

Рисунок 2.2 - Примеры укладки пиломатериалов

В штабелях или пакетах со шпациями общая ширина шпаций должна составлять при укладке обрезных досок - 35%, не обрезных - 57% от ширины штабеля. Шпации должны быть распределены равномерно по ширине штабеля.

Горизонтальные ряды пиломатериалов в пакетах и штабелях должны разделяться межрядовыми прокладками, а пакеты по высоте штабеля - межпакетными.

Главное внимание уделяют шагу прокладок, а также вертикальности их рядов – это основной признак качества укладки пиломатериалов.

Расстояние между прокладками по длине штабеля (шаг прокладок) зависит от древесной породы, толщины и ширины пиломатериала, конечной влажности.

При высушивании хвойных пиломатериалов с конечной влажностью

(10...12)% шаг прокладок ш принимают равным 20-кратной толщине Т досок, т.е. $ш = 20Т$.

При сушке дубовых и буковых досок, которые значительно коробятся, $ш = 15Т$.

Если конечная влажность древесины (5...7) %, а сортименты короткие, назначают $ш = 10Т$.

В случае высушивания хвойных пиломатериалов до транспортной влажности следует принимать $ш = 35Т$.

Длина межрядовых прокладок зависит от ширины штабеля, их ширина (35...45) мм, толщина ($25 \pm 0,5$) мм.

При сушке толстых пиломатериалов в высоких штабелях рекомендуются прокладки шириной 50 мм.

Межпакетные прокладки изготавливают квадратного сечения не менее 70 x 70 мм.

По высоте штабеля прокладки следует укладывать строго вертикально одна над другой. Сбившиеся прокладки выправляют. Нижняя прокладка должна находиться над опорным брусом или над другим прочным основанием. Крайние прокладки у лицевого ровного торца штабеля укладывают заподлицо с торцами досок.

Прокладки изготавливаются из древесины хвойных и лиственных пород, не имеющей гнили и синевы.

Прокладки используют только сухие, после калибровки на рейсмусовом станке при строгании с одной стороны.

Количество межрядовых прокладок по длине пакета или штабеля приведено в таблице 1.

Количество межпакетных прокладок по длине пакетного штабеля должно быть таким же, как и количество межрядовых прокладок. При формировании штабеля межпакетные прокладки должны размещаться в одном вертикальном ряду с межрядовыми прокладками пакетов.

Таблица 1 - Рекомендуемое количество прокладок в горизонтальном ряду пиломатериалов по длине пакета или штабеля

Толщина пиломатериалов, мм	Хвойные породы			Лиственные породы		
	длина пакета или штабеля, м					
	2,5	4,0...4,5	6,5...6,8	2,5	4,0...4,5	6,5...6,8
16...19	5	8	12	7	10	14
22...25	5	7	10	6	9	12
32...40	4	5	7	5	7	9
50 и более	3	4	6	4	5	7

2.3 Влияние режима сушки древесины на ее физические свойства

Режим сушки древесины - это совокупность тепловлажностных воздействий сушильного агента на древесину, обеспечивающих заданное качество и скорость его сушки. В зависимости от требований, предъявляемых к качеству сушки древесины, древесина может высушиваться режимами различных категорий по температурному уровню.

При использовании режимов высокотемпературного процесса агентом сушки служит перегретый пар при атмосферном давлении с температурой выше 100°C.

В каждом конкретном случае режимы той или иной категории выбирают с учетом характера их воздействия на свойства древесины. При низкотемпературных режимах сушки в качестве сушильного агента используется влажный воздух с температурой в начальной стадии до 100°C. К низкотемпературным режимам сушки относятся мягкие, нормальные и форсированные режимы.

Мягкие режимы сушки обеспечивают бездефектную сушку древесины при полном сохранении естественных физико-механических свойств древесины, прочности и цвета. Эти режимы рекомендуются для сушки до транспортной влажности экспортных пиломатериалов, в которых не

допускается выплавление смолы, выпадение сучков и изменение натурального цвета (потемнение древесины хвойных пород или пожелтение буковой и березовой древесины от нагревания).

Нормальные режимы сушки обеспечивают бездефектную сушку древесины при полном сохранении прочностных показателей древесины с незначительными изменениями ее цвета. Данные режимы рекомендуются для сушки древесины для внутреннего потребления до любой влажности.

Низкотемпературные режимы сушки пиломатериалов делятся на 2 группы: 1 - для хвойных пород, 2 - для лиственных пород. В зависимости от группы, низкотемпературные режимы сушки имеют несколько уровней (ступеней). В процессе сушки древесины в переход с одной ступени на другую осуществляется по определенной влажности древесины. Например, при сушке древесины хвойных пород эти значения составляют 35% и 25%. Для обеспечения своевременного перехода с одной ступени процесса сушки на другую разработаны системы автоматического управления сушильной, а также управление техпроцессом сушильных камер в полуавтоматическом режиме.

Форсированные режимы сушки обеспечивают бездефектную сушку древесины при сохранении прочности на статический изгиб, растяжение и сжатие, но при снижении прочности на скалывание и раскалывание до 20% с потемнением древесины. Такие режимы рекомендуются для сушки до эксплуатационной влажности древесины и предназначена для изделий, работающих с большим запасом прочности.

Высокотемпературные режимы сушки обеспечивают бездефектную сушку древесины при незначительном уменьшении прочности на статический изгиб, растяжение и сжатие, при заметном снижении прочности до 35% на скалывание и раскалывание с потемнением древесины. В этих режимах рекомендуется сушка до эксплуатационной влажности древесины целевого назначения для изделий, работающих с большим запасом прочности.

В зависимости от назначения высушиваемых пиломатериалов нормативами установлены четыре категории качества сушки

древесины: I, II, III и 0.

I категория качества сушки - высококачественная сушка древесины до влажности 6-8% при температуре не более 60-70°C. 60°C относится только к толстым пиломатериалам. Данная категория качества сушки древесины должна обеспечить возможность механической обработки и сборки деталей для высокоточных ответственных соединений, влияющих на эксплуатационные показатели изделий (производство моделей, лыж, приборостроение, точное машиностроение и приборостроение, силовые конструкции).

II категория качества сушки - повышенное качество сушки древесины до влажности 6-10% при температуре не более 75-85°C. Допускаемое снижение прочности пиломатериалов на скалывание и ударный изгиб не более 5%. Данная категория качества сушки древесины требуется для ответственных соединений, от которых зависит качество изделий (производство столярно-строительных изделий ответственного назначения, мебельное производство и др.)

III категория качества сушки - среднее качество сушки древесины до влажности 8-15%. Данная категория качества сушки древесины должна обеспечить механическую обработку и сборку деталей для менее ответственных деталей (производство столярно-строительных изделий, погонаж, товарное вагоностроение, тара и др.)

0 категория качества сушки - сушка древесины до транспортной влажности 16-22% (древесина для экспорта и внутреннего потребления).

К показателям качества сушки относятся:

- соответствие средней влажности высушенных пиломатериалов в штабеле заданной конечной влажности;
- величина отклонений влажности отдельных досок или заготовок от средней влажности пиломатериалов в штабеле;
- перепад влажности по толщине пиломатериалов /заготовок/;
- остаточные напряжения в высушенных пиломатериалах /заготовках/.

Показатели качества сушки пиломатериалов /заготовок/ подлежат

нормированию. Нормы устанавливаются в зависимости от категории качества сушки и условий эксплуатации изделий.

Сушка древесины по I и II категориям качества предусматривает снятие остаточных деформаций и напряжений с помощью влаготеплообработки (увлажнения).

2.4 Проведение процессов сушки древесины

Перед началом сушки помещение камеры и элементы ее оборудования очищают от мусора и пыли.

Затем камеру прогревают сухим воздухом во избежание конденсации влаги на оборудовании и ограждениях камеры. Одновременно с подготовкой камеры пиломатериалы укладывают в штабеля.

К технологическим операциям процесса сушки относятся: начальный прогрев древесины, собственно сушка по определенному режиму, конечная (в ряде случаев промежуточная) влаготеплообработка и кондиционирование.

Начальный прогрев древесины проводится после загрузки камеры материалом с целью быстрого прогрева древесины в среде повышенной температуры и влажности.

Собственно сушка следует за начальным прогревом.

В камере устанавливают и поддерживают заданные режимом сушки параметры сушильного агента (воздуха). Сушку заканчивают при достижении материалом заданной конечной влажности.

Для снятия внутренних напряжений, возникающих в древесине при сушке, и опасности растрескивания во второй стадии сушки, в ряде случаев проводят промежуточную влаготеплообработку древесины, часто называемую пропаркой.

После окончания сушки древесину подвергают конечной влаготеплообработке в среде повышенной температуры и влажности.

После конечной влаготеплообработки иногда проводят кондиционирование для выравнивания влажности древесины по объему штабеля.

В процессе сушки выполняют контрольные операции. В течение всего процесса сушки непрерывно или периодически (через 1-2 часа) ведут контроль за температурой и степенью насыщения сушильного агента. По данным контроля регулируют параметры среды в камере. Один-два раза в сутки контролируют влажность высушиваемых пиломатериалов. По результатам этого контроля изменяют параметры сушильного агента, приводя их в соответствие с режимными.

По окончании сушки для выравнивания конечной влажности древесины по объему штабеля и толщине пиломатериалов проводят кондиционирующую обработку. С этой целью в камере с помощью калориферов и увлажнительных устройств поддерживают такое состояние среды, при котором недосушенные сортаменты подсыхают, а пересушенные увлажняются.

Температура среды во время кондиционирующей обработки поддерживается на (5-8) °С выше температуры на последней ступени режима сушки, но не более 100°С, а степень насыщенности должна соответствовать (по диаграмме равновесной влажности) средней заданной конечной влажности, увеличенной на 1%.

Продолжительность кондиционирующей обработки зависит от многих факторов и назначается в соответствии с категорией качества сушки, а также особенностями камеры и материала.

Для пиломатериалов I категории качества кондиционирующая обработка обязательна. Ее продолжительность ориентировочно равна половине продолжительности конечной влаготеплообработки.

Для пиломатериалов II и III категории качества кондиционирующую обработку назначают по мере надобности в соответствии с результатами контроля равномерности конечной влажности по предшествующим сушкам аналогичного материала. Выгрузка штабелей из сушильной камеры должна

производиться только после их предварительного охлаждения в камере (во избежание растрескивания, особенно в зимнее время) до температуры не выше 40°C, после чего камеру в течение нескольких часов осторожно проветривают через приоткрытые двери, затем окончательно охлаждают интенсивным проветриванием и разгружают.

Продолжительность охлаждения до температуры (30-40)°С принимается из расчета около 2 ч на каждый сантиметр толщины пиломатериала.

При охлаждении толстого материала со значительной конечной влажностью возможен пуск в камеру в небольшом количестве увлажнительного пара, задерживающего пересыхание поверхности охлаждаемого материала.

До поступления в производство материал должен окончательно охладиться на складе (тонкий - 1 сутки, а толстый - не менее 2 суток) в сушильных штабелях. В случае разгрузки теплого материала возникнет дополнительное коробление, искривление и т.п. освободившихся от зажатия досок, не достигших еще более жесткого стабильного состояния.

2.5 Дефекты сушки пиломатериалов и их предупреждение

Древесину сушат с целью повышения ее физико-механических свойств, улучшения качества и сохранности, поэтому любые отклонения от нормальных показателей качества должны рассматриваться как результат неудовлетворительного ведения сушильного процесса.

Основные дефекты:

- недосушка всего штабеля пиломатериалов;
- неравномерное их просыхание по объему штабеля и по толщине сортимента;
- недопустимо большое коробление пиломатериалов во время сушки;
- растрескивание;
- плесень;
- коллапс;
- раковины.

Причины появления дефектов сушки и их предупреждение:

1. Недосушка древесины происходит при досрочной выгрузке пиломатериалов из камеры, при неудовлетворительном контроле процесса сушки или преднамеренном нарушении технологии (например, из-за срочной потребности в материале). Необходим систематический контроль за соблюдением технологии сушки.

2. Неравномерное просыхание по:

- толщине материала возникает с применением форсированного процесса сушки при значительной конечной влажности древесины.

Необходимо проведение конечной влаготеплообработки (выдержки), обязательной для пиломатериалов I и II качественной категории;

- длине штабеля является следствием неравномерной раздачи воздуха или его нагрева по длине камеры, а также неудовлетворительного состояния дверей. Надлежит отрегулировать равномерность распределения воздуха и его нагревания, а также заменить двери на утепленные, герметичные;

- ширине штабеля наблюдается при слабом движении воздуха, необходимо экранировать штабель для избежания перетекания воздуха помимо материала, а также увеличить подачу воздуха вентиляторами. В качестве паллиативного решения применяют разреженную укладку материала в местах его недосухания;

- высоте штабеля происходит из за несоблюдения вертикальности рядов штапелей (в камерах с естественной циркуляцией) и слабой циркуляцией воздуха. необходимо улучшить укладку пиломатериалов в штабель и модернизировать сушильные камеры на реверсивные;

- объему штабеля наблюдается при слабой циркуляции воздуха, укладке в штабель разных сортиментов, сдвоенной укладке пиломатериалов, применении широких (более 40мм) заготовок в качестве прокладок, укладке заготовок в клетку с частыми прокладками и др. Такие дефекты в укладке не допускаются.

3. Коробление материала во время сушки как продольное, так и

поперечное - следствие плохого его зажатия, т.е. неудовлетворительной его укладки в штабель. Коробление после сушки происходит при наличии в высушенном материале влажности и упругих деформаций, поэтому необходимо проводить надлежащую конечную влаготеплообработку высушенных пиломатериалов и не загружать их до полного охлаждения древесины, т.е. охлаждать только в штабеле. Возникновение трещин внутри материала, готовых изделий происходит вследствие выравнивания влажности по толщине материала после сушки. Метод предупреждения - строгое соблюдение режимных параметров во второй стадии сушки и проведение надлежащей конечной влаготеплообработки материала после окончания сушки.

4. Растрескивание торцов и пластей материалов происходит при форсированном процессе в начале сушки; необходимо смягчить режим сушки. Растрескивание свежеспиленных торцов досок и заготовок наблюдается в самом начале процесса сушки из-за быстрого их высыхания. Метод предупреждения - защита торцовых зон экранами, которые снижают скорость агента сушки и тем самым уменьшают влагоотдачу за счет снижения коэффициента влагопроводности вдоль волокон.

5. Плесень на материале появляется при застойной циркуляции воздуха. Рекомендуется усилить движение воздуха, повысить его температуру, применить влаготеплообработку.

6. Коллапс или сморщивание древесины возникает при камерной сушке дуба и некоторых пород, эвкалипт, ясень, тополь, ива, кипарис. Внешне коллапс проявляется в том, что пиломатериалы приобретают вид "стиральных досок", а поперечное сечение пиломатериалов и брусков изменяет свою форму. Для его предотвращения следует пиломатериалы до камерной сушки предварительно просушивать либо в атмосферных условиях, либо специальных предрайдерах.

7. Возникновение раковин во второй стадии из-за форсированного процесса в первой стадии. Надлежит проводить промежуточную

влажготеплообработку материала по II стадии.

3 Оборудование сушильных камер

3.1 Промышленное оборудование

Сушка древесины является одной из важнейших операций в технологии переработки древесины. Назначение сушки — снижение влажности древесины до уровня, соответствующего условиям эксплуатации изготовленных из неё изделий, что предупреждает изменение их размеров и формы, предохраняет древесину от загнивания, увеличивает её прочность, снижает массу изделий, повышает надёжность клеевых соединений и качество отделки.

В настоящее время существует множество предприятий, занимающихся переработкой и сушкой древесины. Одно из них находится в Красноярске.

На этом предприятии установлена лесосушильная модульная камера серии СКМ-15, предназначенная для сушки пиломатериалов твердолиственных и хвойных пород.

Корпус камеры имеет теплоизоляционный слой жесткой, минераловатной плиты, не впитывающей влагу и с высокой степенью огнестойкости. Все стальные элементы, для предотвращения коррозии, защищены антикоррозионным термовлагостойким покрытием.

Модульная лесосушильная камера работает на тепловой энергии, получаемой от сжигания отходов деревообрабатывающего производства в теплогенераторах или стационарных, газовых котельных. Нагретая вода при помощи насоса подается по входящим в комплект трубопроводам в установленные вдоль боковой стены лесосушильной камеры радиаторы, пройдя через которые опять поступает в котел. Используемые водяные регистры представляют собой одноходовые двухрядные калориферы из биметаллических труб (стальные с винтовым алюминиевым оребрением).

В ходящий в комплект сушильной камеры водогрейный котел

работает на кусковых (щепа, обрезки, горбыль – 70-100% от объема) отходах деревообработки в смеси опилками (до 30%). При большом объеме опилок (до 100%) твердотопливный котел комплектуется бункером - ворошителем со шнековой подачей опилок (рисунок 3.1), либо газогенератором с механической загрузкой, что позволяет использовать для отопления деревоотходы любой фракции (горбыль, опилки, стружка, кора). Для более эффективной и устойчивой работы котла в поддувало устанавливается вентилятор наддува, а в боров дымовой трубы эжектор.

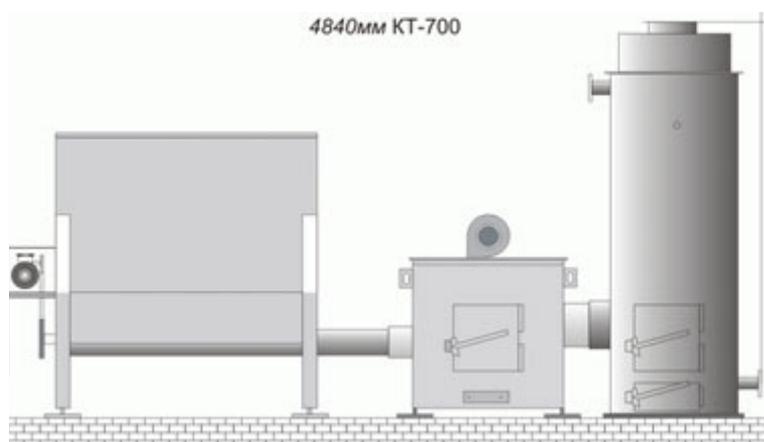


Рисунок 3.1 - Тепловой комплекс, состоящий из бункера для сыпучего топлива, шнекового транспортёра подачи топлива, камеры предварительного сгорания (газогенератора) и водяного котла

Отопительный комплекс решает одновременно две задачи: утилизации отходов и очень дешевого теплообеспечения. Эффективность сжигания значительно повышена за счет использования, так называемого газогенераторного или пиролизного эффекта. По сравнению с котлами поверхностного горения, пиролизные котлы обеспечивают минимальные выбросы вредных веществ. Для таких котлов характерен высокий КПД (не менее 80-90 %) и простота регулирования мощности в диапазоне 30 - 100% от номинальной. Для сравнения, в котлах, где используется метод прямого сжигания растительных отходов (котлы на отходах и дровах, твердотопливные - на твердом топливе, универсальные, булерьян и прочие котлы) потребляют в

2,5 - 3 раза больше сырья и имеют КПД около 40-70%. Основным отличием котлов с пиролизным сжиганием является то, что в них горят не сами отходы деревопереработки, а древесный газ, выделяющийся из них под воздействием высокой температуры. В пиролизной камере температура может достигать 1340-1790 °С. Во время такого сжигания не образуется сажа и возникает минимальное количество золы (обычно зольность не превышает 0,5%).

Теплотворная способность различных видов твердого топлива сведена в таблице 2.

Таблица 2 - Теплотворная способность топлива

Вид топлива	Теплотворная способность, ккал/кг
Уголь-антрацит	7 750-8 100
Уголь древесный	7 050
Пеллеты	4200
Уголь каменный	3 550-6 450
Опилки	3500-3800
Торф	2500-3500
Дрова	2000-2500

Для теплообмена между водяными регистрами и воздухом внутри лесосушильной камеры устанавливается центробежный роторный вентилятор (рисунок 3.2), электродвигатель которого установлен снаружи лесосушильной камеры для сушки древесины. Использование роторных вентиляторов позволяет снизить потребление электроэнергии на вентиляцию в лесосушильных камерах в 1,7 раза. Наиболее оптимальная поперечная продувка штабеля и температурный режим внутри лесосушильной камеры сушки пиломатериалов обеспечивается экранами и управляемым снаружи блоком жалюзи. Такая конструкция обеспечивает легкий доступ для ревизии и обслуживания роторного вентилятора и регистров. Для воздухообмена с атмосферой устанавливаются алюминиевые

приточно-вытяжные заслонки.



Рисунок 3.2 - Вентилятор с внешним ротором.

Вентиляторы для сушильных камер — основное циркуляционное оборудование, от правильного выбора и установки которого зависит как производительность сушильных камер, так и качество сушки древесины. Вентиляторы в сушильных камерах используются для создания необходимой скорости воздуха (газа) внутри сушильного пространства камер и черезштабеля высушиваемых пиломатериалов.

По принципу действия вентиляторы для сушильных камер разделяют на два класса: осевые и центробежные.

Центробежный вентилятор (рисунок 3.3) состоит из трех основных частей: рабочего колеса с лопастями, иначе называемого ротором или турбиной, спирального кожуха и станины. При вращении колеса в его полости создается разрежение. Воздух, поступающий в полость колеса, захватывается его лопастями, сжимается и под действием центробежной силы отбрасывается в кожух, изменяя направление своего движения на 90° . Лопатки вентиляторных колес могут быть различного исполнения: загнутые вперед, радиальные и загнутые назад. Самое большое давление создает колесо с лопатками загнутыми вперед, вследствие чего эти лопатки получили наибольшее распространение. При работе вентилятора необходимо следить за тем, что бы колесо вращалось в сторону раскручивания спирали

кожуха. При вращении его в противоположную сторону направление движения воздуха не изменяется, но КПД и производительность вентилятора резко падают.



Рисунок 3.3 - Центробежный вентилятор

Осевой вентилятор состоит из осевого колеса, цилиндрической обечайки (открытый цилиндрический или конический элемент конструкции (типа обода или барабана, кольца, короткой трубы), используемый в изготовлении сварных или деревянных сосудов, резонаторов музыкальных инструментов, стенки люков и т. д.) и электродвигателя. В осевых вентиляторах воздух не изменяет своего основного направления и проходит параллельно оси лопаточного колеса, как бы ввинчивающегося в поток воздуха.

Осевые вентиляторы (рисунок 3.4) отличаются большой производительностью, но развивают невысокое давление. Достоинством осевых вентиляторов является простота их устройства и монтажа. Вентиляторы можно устанавливать в стенных проемах, непосредственно в воздуховодах и калориферных сушильных камерах.

Недостатком осевых вентиляторов является малое развиваемое давление и шум, особенно при большом числе оборотов.



Рисунок 3.4 - Осевой вентилятор

В основном все осевые вентиляторы имеют общий вал с электродвигателями. В некоторых случаях соединение вентилятора с электродвигателями осуществляется через промежуточный вал. Это делается с целью выноса электродвигателя из воздушного потока со взрывоопасными или агрессивными примесями, а также для изменения числа оборотов вентилятора.

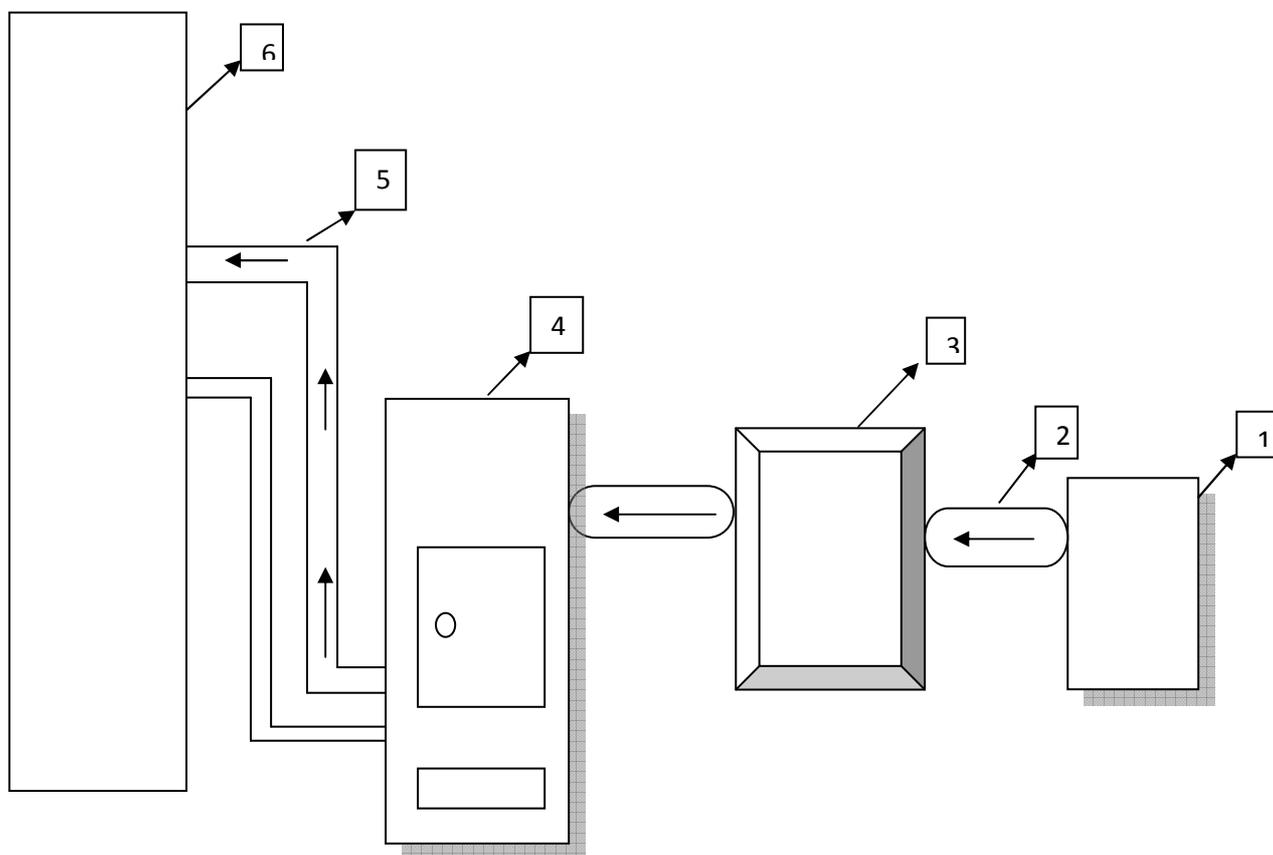
3.2 Использование вторичных отходов

На деревоперерабатывающем предприятии города Красноярска очень актуально использование вторичных энергоресурсов, а именно опилок. Бункером для них служит обычная бочка (рисунок 3.5):



Рисунок 3.5 - Бункер для сыпучего топлива

С помощью шнекового транспортера подачи топлива она соединена с газогенератором (рисунок 3.6). прием позволяет. Такой существенно экономить затраты на сушку, так как нет расходов на топливо.



1-бункер для опилок; 2-патрубок шнековой подачи топлива; 3-газогенератор; 4-водогрейный котёл; 5-трубы; 6-сушильная камера

Рисунок 3.6 - Схема теплового блока

4 Тепловой расчет сушильной камеры

4.1 Основные расчетные формулы

Расчеты конвективных сушилок можно найти в специальной литературе, основными расчетными формулами при тепловом расчете действительной сушильной камеры являются:

Количество испаряемой влаги с 1 м³ материала:

$$W_M = 10\rho_{\text{усл}}(\omega_H - \omega_K)$$

То же за один оборот камеры:

$$W_{\text{об.к.}} = W_M V_T \beta$$

То же за час:

$$W_{\text{час}} = \frac{W_{\text{об.к.}}}{\tau}$$

Удельный расход тепла на нагрев древесины:

$$q_H = \frac{q_{\text{н.м.}}}{W_M}$$

Расход тепла на испарение влаги в среде влажного воздуха:

$$q_{\text{и}} = \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} \cdot 1000 - \vartheta_M$$

Расчет теплотерь производится по формуле:

$$Q_5 = kF(t_1 - t_2)$$

Удельный расход тепла на потери через ограждения:

$$q_5 = \frac{Q_5}{W}$$

Суммарный расход тепла на 1 кг испаренной влаги:

$$q = q_H + q_{\text{и}} + q_5$$

Расход пара на 1 кг испаренной влаги:

$$D = \frac{q}{r\eta}$$

4.2 Расчетная часть

Выполнить тепловой расчет сушильной камеры непрерывного действия.

Исходные данные:

Внутренние размеры камеры: 6,85×2,92×2,64

В камере располагаются 15 штабелей

Размеры штабеля: 6×1×1,10

Производительность сушильного цеха 1800 м³ условного материала в год.

Материал: сосновые обрезные доски размером 6×0,035×0,095

Начальная влажность материала: $\omega_H = 65\%$

Конечная влажность материала: $\omega_K = 12\%$

Режим сушки: $t=65^\circ\text{C}$, $\varphi = 31\%$

Продолжительность сушки: $\tau=7$ суток.

Теплоноситель: вода

Согласно заданию, параметры сухого воздуха на сухом конце камеры: $t=65^\circ\text{C}$, $\varphi_1=31\%$. Определяем по Id-диаграмме (приложение 1): $I_1=270$ ккал/кг, $d_1=382$ г/кг, $\rho_1=0,78$ кг/м³, $v_1=1,77$ м³/кг; для сырого конца устанавливаем $\varphi_2=90\%$.

Количество испаряемой влаги с 1 м³ материала определяем по формуле:

$$W_M = 10\rho_{\text{усл}}(\omega_H - \omega_K) \quad (4.1)$$

где $\rho_{\text{усл}}$ – условная плотность материала;

ω_H и ω_K – начальная и конечная влажности соответственно.

$$W_M = 10\rho_{\text{усл}}(\omega_H - \omega_K) = 10 \cdot 0,43 \cdot (65 - 12) = 228 \text{ кг/м}^3$$

Определим то же за один оборот камеры (7 суток):

$$W_{\text{об.к.}} = W_{\text{м}} V_{\text{г}} \beta \quad (4.2)$$

где $W_{\text{м}}$ – количество испаряемой влаги с 1 м^3 материала;

$V_{\text{г}} = 6 \cdot 1 \cdot 1,10 \cdot 15 = 99 \text{ м}^3$ – габаритный объем штабелей в камере;

$\beta = 0,367$ – объемный коэффициент заполнения штабеля при сушке условного материала.

$$W_{\text{об.к.}} = W_{\text{м}} V_{\text{г}} \beta = 228 \cdot 99 \cdot 0,367 = 8284 \text{ кг/об}$$

То же за час:

$$W_{\text{час}} = \frac{W_{\text{об.к.}}}{\tau}, \quad (4.3)$$

где $W_{\text{об.к.}}$ - количество испаряемой влаги с 1 м^3 материала за один оборот камеры;

$\tau = 24 \cdot 7 = 168$ часов – продолжительность оборота камеры.

$$W_{\text{час}} = \frac{W_{\text{об.к.}}}{\tau} = \frac{8284}{168} = 49,3 \text{ кг/час}$$

Определим расход тепла на сушку древесины.

Расчетные данные для города Красноярска:

$$t_0 = -23^\circ\text{C}$$

$$d_0 = 0$$

$$I_0 = -9 \text{ ккал/кг}$$

$$t_{\text{ср.год.}} = 1,3^\circ\text{C}$$

$$d_{\text{ср.год.}} = 3 \text{ г/кг}$$

$$I_{\text{ср.год.}} = -1 \text{ ккал/кг}$$

Расход тепла на оттаивание и нагрев до 50°C 1 кг мерзлой древесины с $\omega_H = 65\%$:

для зимних условий ($t_0 = -23^\circ\text{C}$):

$$q_H = 50 + 64 = 114 \text{ ккал/кг}$$

для среднегодовых ($t_{\text{ср.год.}} = 1,3^\circ\text{C}$):

$$q_H = 20 + 64 = 84 \text{ ккал/кг}$$

Расход тепла на нагревание 1 м³ влажной мерзлой древесины, если масса 1 м³ при $\rho_{\text{усл}} = 0,43$ и $\omega_H = 65\%$, будет $\rho_\omega = 770 \text{ кг/м}^3$:

Для зимних условий:

$$q_{\text{н.м.}} = \rho_\omega \cdot q_H \cdot 1,1 = 770 \cdot 114 \cdot 1,1 = 96558 \text{ ккал/м}^3$$

для среднегодовых:

$$q_{\text{н.м.}} = 770 \cdot 84 \cdot 1,1 = 71148 \text{ ккал/м}^3$$

Удельный расход тепла на нагрев древесины, на 1 кг испаренной влаги определим по формуле:

$$q_H = \frac{q_{\text{н.м.}}}{W_M}, \quad (4.4)$$

где $q_{\text{н.м.}}$ – расход тепла на нагрев мерзлой древесины;

W_M – количество испаряемой влаги с 1 м³ материала.

Для зимних условий:

$$q_H = \frac{q_{н.м.}}{W_M} = \frac{96558}{228} = 423,5 \text{ ккал/кг}$$

Для среднегодовых:

$$q_H = 312 \text{ ккал/кг}$$

Определим расход тепла на испарение влаги в среде влажного воздуха:

$$q_{и} = \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} \cdot 1000 - \vartheta_M, \quad (4.5)$$

где ϑ_M – температура материала, принимается равной температуре мокрого термометра для состояния воздуха t_1 и ϕ_1 по выбранному режиму.

Для зимних условий:

$$q_{и} = \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} \cdot 1000 - \vartheta_M = \frac{270+9}{394-0} \cdot 1000 - 75 = 634 \text{ ккал/кг}$$

Для среднегодовых:

$$q_{и} = \frac{270+1}{394-1,3} \cdot 1000 - 75 = 615 \text{ ккал/кг}$$

Расчет теплопотерь через ограждения камеры.

Расчетными ограждениями боковой камеры являются: боковая наружная стена, торцевые стены, дверь, потолок, пол.

Расчет теплопотерь производим по формуле:

$$Q_5 = kF(t_1 - t_2), \quad (4.6)$$

Полученные данные сводим в таблицу 3:

Таблица 3 – Расчет теплотерь ограждений

Ограждения	F, м ²	k	$\frac{t_1 + t_2}{2}$	t ₀		$\frac{t_1 + t_2}{2} - t_0$		Q ₅ , ккал/ч	
				з	ср.г	з	ср.г	з	ср.г
Боковые стены, 2	15,42	0,8	78	-23	1,3	101	76,7	8400	7600
Торцевые стены, 2	36,2	0,8	78	+20	+20	58	58	2534	2534
Дверь	12	0,8	78	+20	+20	58	58	840	840
Потолок	40	0,7	78	-23	1,3	101	76,7	2800	1900
Пол	40	0,4	78	-23	1,3	101	76,7	2800	1900
Итого								7374	4774
+10% (по ГОСТ)								737	478
ΣQ								9111	6252

Всего при коэффициенте, учитывающем потери тепла за счет неорганизованного воздухообмена (через не плотности ограждения), равном 2, получаем:

Для зимних условий:

$$Q_5 = 2 \cdot 19111 = 38222 \text{ ккал/ч}$$

Для среднегодовых:

$$Q_5 = 32504 \text{ ккал/ч}$$

Удельный расход тепла на потери через ограждения определим по формуле:

$$q_5 = \frac{Q_5}{W}, \quad (4.7)$$

где Q_5 – теплопотери;

W – количество испаряемой влаги.

Для зимних условий:

$$q_5 = \frac{Q_5}{W} = \frac{38222}{632} = 60 \text{ ккал/ч}$$

для среднегодовых:

$$\bar{q}_5 = 51 \text{ ккал/ч}$$

Суммарный расход тепла на 1 кг испаренной влаги:

Для зимних условий:

$$q = q_n + q_{и} + q_5 = 114 + 634 + 60 = 808 \text{ ккал/кг}$$

Для среднегодовых:

$$\bar{q} = 84 + 615 + 51 = 750 \text{ ккал/кг}$$

Определим расход воздуха на 1 кг испаренной влаги:

$$D = \frac{q}{r\eta}, \tag{4.8}$$

где η – коэффициент, учитывающий потери;

r – теплота конденсации воздуха.

$$D = \frac{q}{r\eta} = \frac{808}{499,2 \cdot 0,9} = 1,8 \text{ кг/кг испаренной влаги.}$$

Определение часового количества циркулирующего агента сушки – воздуха в камере.

Определим перепад энтальпии влажного воздуха, связанный с потерями тепла при его движении в камере по формуле:

$$\Delta I = \frac{q_H + q_5 - \vartheta_M}{l_0}, \quad (4.9)$$

где $l_0 = 100$ ккал/кг (по Id-диаграмме, приложение 1);

ϑ_M – температура материала, принимается равной температуре мокрого термометра для состояния воздуха t_1 и φ_1 по выбранному режиму.

$$\Delta I = \frac{q_H + q_5 - \vartheta_M}{l_0} = \frac{114 + 60 - 75}{100} = 0,99 \text{ ккал/кг}$$

По заданным параметрам t и $\varphi_1 = 0,9$ и по значению ΔI на Id-диаграмме строим процесс сушки:

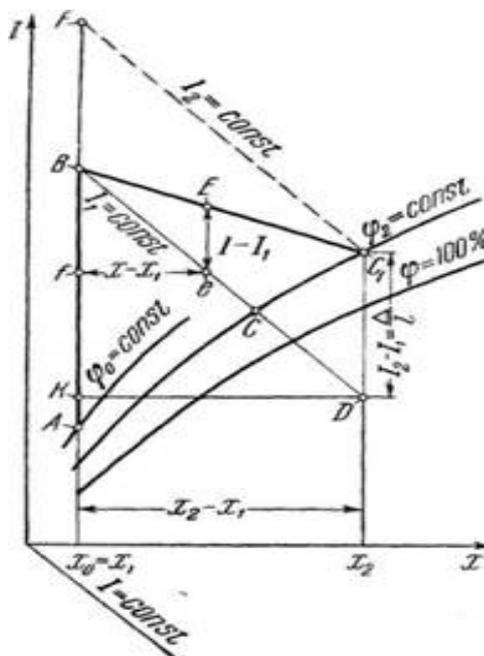


Рисунок 4.1 - Схема действительного процесса сушки в камере на Id-диаграмме

Параметры в сыром конце камеры:

$$t_2 = 65^\circ\text{C}, \varphi_2=90\%, I_2 = 226 \text{ ккал/кг}, d_2 = 394 \text{ г/кг}.$$

Количество циркулирующего воздуха на 1 кг испаренной влаги:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{394 - 382} = 83 \text{ кг/кг}$$

Часовое количество и объем циркулирующего в камере воздуха:

$$G_{\text{ц}} = l \cdot W = 83 \cdot 632 = 52456 \text{ кг/ч}$$

$$V_{\text{ц}} = G_{\text{ц}} \cdot v_1 = 52456 \cdot 1,77 = 92847 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ или } V_{\text{сек}} = 26 \text{ м}^3/\text{сек}$$

Скорость циркуляции воздуха в штабелях:

$$v = \frac{V_{\text{сек}}}{F_{\text{шт}}} = \frac{26}{6 \cdot 1 \cdot 1,1} = 3,9 \text{ м/сек}$$

Объем отработавшего воздуха, удаляемого из камеры:

$$V_{\text{отр}} = W \cdot v_2 = 632 \cdot 1,65 = 1043 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Объем приточного воздуха в камеру:

$$V_{\text{прит.}} = W \cdot v_0 = 632 \cdot 0,8 = 506 \text{ м}^3/\text{ч}$$

где v_2 и v_0 – удельные объемы отработавшего и приточного воздуха соответственно.

Здесь v_2 взято при $t = 77 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_2 = 394 \text{ г/кг}$ по графику (рис. 4.2.1) и v_0 взято при $t = -23 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d_0 = 0$.

Выбор и расчет калорифера.

Часовой расход тепла определим по формуле:

$$Q_{\text{кал}} = Q_{\text{н}} + Q_{\text{исп}} + \Sigma Q_{\text{огр}}, \quad (4.10)$$

где $Q_{\text{н}}$ – расход тепла на нагрев;

$Q_{\text{исп}}$ – расход тепла на испарение;

$\Sigma Q_{\text{огр}}$ – расход тепла через ограждения.

$$\begin{aligned} Q_{\text{кал}} &= Q_{\text{н}} + Q_{\text{исп}} + \Sigma Q_{\text{огр}} = 114 \cdot 632 + 634 \cdot 632 + 60 \cdot 632 = \\ &= (72048 + 400688 + 37920) \cdot 1,1 = 561722 \frac{\text{ккал}}{\text{ч}}. \end{aligned}$$

Определим поверхность нагрева калорифера:

$$F_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{кал}} C_3}{k(t_{\text{н}} - t)}, \quad (4.11)$$

где C_3 – коэффициент запаса;

t – средняя температура агента сушки;

k – коэффициент теплопередачи калорифера.

$$F_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{кал}} C_3}{k(t_{\text{н}} - t)} = \frac{561722 \cdot 1,15}{27,4(164 - 60)} = 296 \text{ м}^2$$

Для данного типа камеры выбран гладкотрубный калорифер КВО-2-50 (рисунок 4.2):



Рисунок 4.2 - Гладкотрубный калорифер КВО-2-50

Необходимое количество калориферов:

$$n_{\text{кал}} = \frac{296}{45,66} \approx 6$$

Здесь 45,66 – поверхность нагрева калорифера КВО-2-50, согласно таблице 4.

Таблица 4 - Технические характеристики калориферов

Калориферы водяные оребренные двухрядные КВО-2				
Наименование	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм	Площадь поверхности теплообмена, м ²
Калорифер КВО-2-20	2000	500	200	22,1
Калорифер КВО-2-30	2000	600	200	28
Калорифер КВО-2-40	2000	800	200	36,9
Калорифер КВО-2-50	2000	1000	200	45,66

Согласно этим данным, необходимо установить два ряда калориферов по 3 штуки в каждом ряду.

5 Энергосбережение при проведении процесса сушки

5.1 Принципы энергосбережения

Энергосбережение является актуальной проблемой и при проведении процессов сушки. Все методы повышения тепловой экономичности можно разделить на две группы:

1. Теплотехнологические (касающиеся сушильной установки в целом);
2. Кинетические (способствующие повышению интенсивности сушки и тем самым влияющие на габариты установки и ее КПД).

В первой группе методов можно выделять:

а) Теплотехнические (выбор тепловой схемы, режимных параметров сушки, режимов работы установки, коэффициентов рециркуляции, управление конечным влагосодержанием сушильного агента и т. д.);

б) Конструктивно-технологические (оптимизация числа зон промежуточного подогрева, выбор направления взаимного движения сушильного агента и материала, совершенствование систем подвода теплоты, улучшение аэродинамической обстановки в сушилке и т. д.).

Вторая группа методов подразделяется на:

а) Методы интенсификации внешнего тепломассообмена (увеличение температурного напора, движущей силы массообмена, коэффициента теплоотдачи к сушимому материалу, поверхности тепломассообмена и др.);

б) Методы интенсификации внутреннего тепломассообмена (повышение температуры материала, особенно в первом периоде сушки, использование внешних полей - электрических, магнитных, звуковых, использование ПАВ, осциллирующих режимов подвода теплоты).

Для интенсификации процессов сушки и повышения экономической эффективности работы аппаратов могут быть выбраны следующие пути:

1. Использование более высоких начальных температур теплоносителя в условиях автоматизированного контроля и регулирования температуры. С повышением температуры теплоносителя резко сокращается длительность

сушки, в результате материал сохраняет свои качественные показатели. При этом уменьшаются удельные расходы топлива и электроэнергии;

2. Использование больших локальных скоростей (сопловая сушка), пульсирующих газовых потоков и вибраций частиц материала, закрученных высокоскоростных потоков (вихревая сушка) и т.д.;

3. Применение перегретых паров испаряемой из материала жидкости в качестве теплоносителя (водяные пары, пары органических растворителей - тетрахлорид углерода, хлорбензол и т.д.);

4. Изменение свойств окружающей среды, например при использовании вместо воздуха инертных газов, инертных к влаге жидких сред, при осуществлении процесса в разреженной среде или при повышенном давлении (в последнем случае изменяются тепло- и массопереносные свойства среды и может ускоряться удаление влаги из материала);

5. Применение электромагнитных излучений (инфракрасного, высокочастотного диапазонов), позволяющих резко увеличить поток подводимой к материалу энергии.

Интенсификация внутреннего переноса осуществляется:

1. Изменением, если это допустимо технологией, структуры материала перед или при сушке с целью увеличения теплопроводности;

2. Введением в объем материала малых добавок, например поверхностно-активных веществ, что также может оказывать ускоряющее влияние на внутренний перенос;

3. Управлением характером распределения температуры, влагосодержания и давления в объеме материала за счет применения различных, часто изменяющихся во времени способов и параметров энергоподвода к материалу.

Наиболее эффективными в большинстве случаев оказываются комбинированные методы интенсификации сушки. Экономия энергии в результате интенсификации осуществляется, прежде всего,

за счет:

1. Сокращения общей длительности процесса и соответственно уменьшения потерь энергии;
2. Локализации подвода энергии и снижения при этом нерационального ее расхода;
3. Снижения расхода сушильного агента и соответственно энергии на его перемещение.

Одним из методов энергосбережения является рекуперация.

Рекуперация - возвращение части материала или энергии, расходуемых при проведении того или иного технологического процесса, для повторного использования в том же процессе. Плюсом рекуперации является экономия энергии, и как следствие, экономия средств на эксплуатацию системы вентиляции. Иногда, когда имеется ограничение в возможном объеме потребляемой энергии и установить мощную обогревательную систему невозможно использование рекуператора является хорошим решением задачи. Минусом является необходимые дополнительные первоначальные вложения на установку рекуператора. Процесс проходит в рекуперационном теплообменнике (рисунок 5.1) таким образом, что выбрасываемый и свежий воздух абсолютно отделены друг от друга, чтобы не произошло их смешивание. В охлаждаемых помещениях можно использовать рекуперационные теплообменники также обратным способом, то есть для рекуперации холода. При этом подводимому воздуху передается холод от отводимого воздуха. Важной характеристикой рекуператоров является коэффициент эффективности рекуперации.

Коэффициент эффективности рекуперации тепла выражает отношение между максимально возможным полученным теплом и теплом, полученным в действительности. Теоретически эффективность может меняться в пределах от 30 до 90 %. Эта характеристика зависит от стоимости, производителя и типа рекуператора.

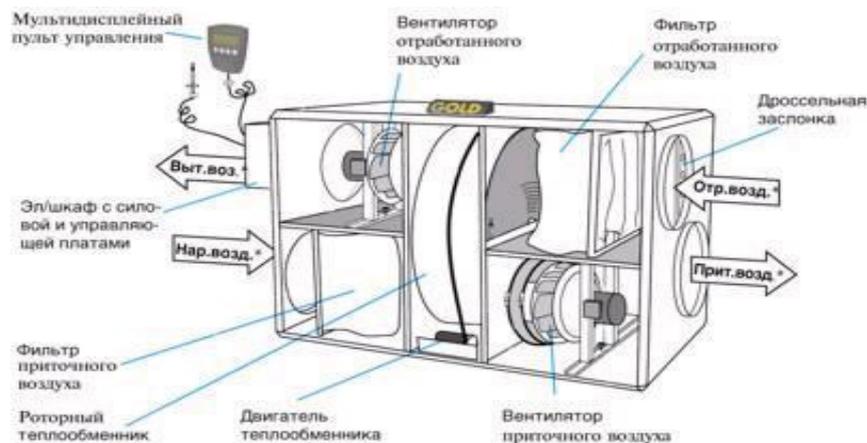


Рисунок 5.1 - Рекуперационный теплообменник

5.2 Типы рекуператоров

- Пластинчатые рекуператоры

Удаляемый и приточный воздух проходят с обеих сторон целого ряда пластин. В пластинчатых рекуператорах (рисунок 5.2) на пластинах может образовываться некоторое количество конденсата, потому они оборудованы отводами для конденсата. Конденсатосборники имеют водяной затвор, не позволяющий вентилятору захватывать и подавать воду в канал. Из-за выпадения конденсата существует серьезный риск образования льда в холодное время года. Пластинчатые рекуператоры характеризуется высокой эффективностью (50-80%), являются самыми распространенными и относительно дешевыми, широко используются на малых предприятиях, и в небольших зданиях, коттеджах, магазинах.

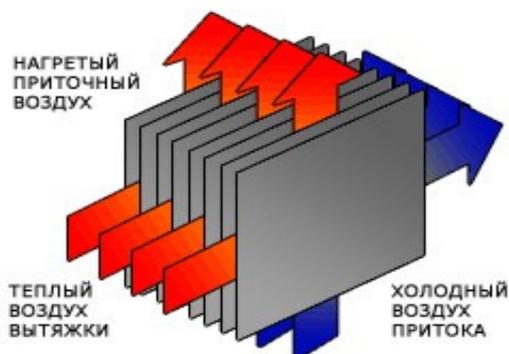


Рисунок 5.2 - Пластинчатый рекуператор

- Роторные рекуператоры

Тепло передается вращающимся между удаляемым и приточным каналами ротором. Это открытая система, и потому здесь велик риск того, что грязь и запахи могут перемещаться из удаляемого воздуха в приточный, однако, некоторые производители утверждают, что в их рекуператорах исключено смешивание.

Уровень рекуперации тепла может регулироваться скоростью вращения ротора. Роторные рекуператоры (рисунок 5.3) обладают самой высокой эффективностью (75-90%), и соответственно ценой. Преимущественно используются на крупных промышленных предприятиях, цехах, в больших зданиях.

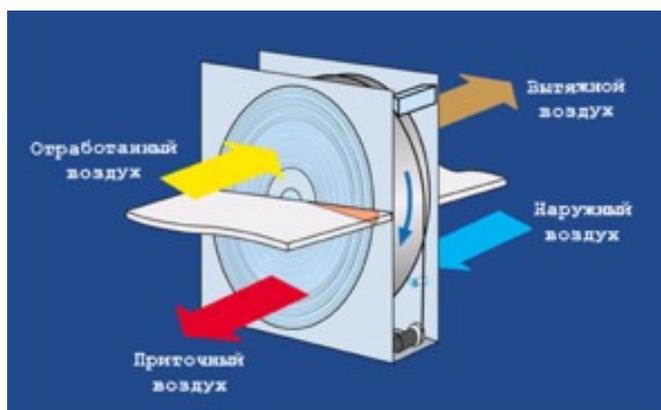


Рисунок 5.3 - Роторный рекуператор

- Рекуператоры с промежуточным теплоносителем

Вода или водно-гликолиевый раствор, циркулирует между двух теплообменников, один из которых расположен в вытяжном канале, а другой в приточном. Теплоноситель нагревается удаляемым воздухом, а затем передает тепло приточному воздуху. Теплоноситель циркулирует в замкнутой системе и отсутствует риск передачи загрязнений из удаляемого воздуха в приточный. Передача тепла может регулироваться изменением скорости циркуляции теплоносителя. Эти рекуператоры имеют низкую эффективность (45-60%). Обладая низкой эффективностью, используются в случае, если удаляемый

воздух сильно загрязнен или токсичен когда смешивание недопустимо.

- Камерные рекуператоры

Камера разделяется на две части заслонкой. Удаляемый воздух нагревает одну часть камеры, затем заслонка изменяет направление воздушного потока таким образом, что приточный воздух нагревается от нагретых стенок камеры. Загрязнение и запахи могут передаваться из удаляемого воздуха в приточный. Характеризуется высокой эффективностью (70-80%).

- Тепловые трубы

Данный рекуператор состоит из закрытой системы трубок, заполненных фреоном, который испаряется при нагревании удаляемым воздухом. Когда приточный воздух проходит вдоль трубок, пар конденсируется и вновь превращается в жидкость. Имеет низкую эффективность (50-70%).

Рекуператор не смешивает вытягиваемый и приточный воздух, а просто передает тепло от одного к другому. Наиболее часто используется два типа – пластинчатый и роторный рекуператор. Роторный рекуператор — это большой барабан, в мелкую ячейку. Через верхнюю часть установки проходит теплый вытягиваемый воздух, через нижнюю часть — холодный уличный. Теплый воздух нагревает ячейки барабана, который медленно поворачивается и нагретой частью нагревает холодный воздух с улицы. Барабан крутится практически постоянно, с небольшой скоростью. Пластинчатый рекуператор еще проще. Теплый вытягиваемый воздух нагревает поверхность щелей и обогревает холодный воздух, проходящий через соседние щели.

Эффективность энергосбережения роторного рекуператора составляет 85%. С главной проблемой рекуператоров – обмерзание – справляются, перекрывая забор воздуха с улицы и обогревая теплым вытягиваемым воздухом рекуператор.

Можно сделать вывод о том, что рациональное использование энергетических ресурсов на предприятии является важной составляющей снижения производственных издержек, и, следовательно, получения

дополнительной прибыли, завоевания большей доли рынка и решения социальных проблем на основе:

- реализации процесса подготовки производства в соответствии с оптимальными режимами ввода основных средств в эксплуатацию;
- использования наиболее рентабельных производственных технологий;
- разработки, освоения и внедрения новой техники и технологий, в которых энергетические ресурсы используются более эффективно;
- улучшения социально-бытовой сферы для персонала машиностроительного предприятия и социального климата населения, проживающего на территории, закрепленной за соответствующим предприятием.

Вследствие этого, энергосбережение рассматривается не как бесцельная экономия энергетических ресурсов, проводимая зачастую за счет сокращения объема производства, а как фактор экономического роста, улучшения благосостояния населения, обеспечения соответствующей экологической и социально-бытовой обстановки. Таким образом, энергосбережение должно быть одним из приоритетных направлений экономической политики промышленного предприятия. В то же время сегодня пристального внимания заслуживает оценка эффективности энергосбережения и ее составляющих, которую необходимо учитывать при последующей разработке целевых программ энергосбережения и сценариев их реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенные мероприятия позволяют достичь снижения расхода основного топлива ориентировочно на 40%, а произведенные расчеты показывают уменьшение затрат на производство процесса сушки в результате использования вторичного сырья.

Данный проект показывает, что использование вторичных ресурсов позволяет не только экономить на топливе, но и снижать себестоимость процесса сушки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. Учебное пособие / под ред. П.Д. Лебедева, А.А. Щукина. М.: «Энергия», 1970. С 11-35.
- 2 Оборудование гидротермической обработки древесины. П.С.Серговский, М.: «Лесная промышленность», 1981. С 6-12.
- 3 Физические основы и расчет процессов сушки древесины. Г.С. Шубин, М.: «Лесная промышленность», 1973. С 918.
- 4 Сушка древесины. А.И. Расев, М.: «Высшая школа», 1980. С 4-25.
- 5 Оценка эффективности инвестиций в энергопроекты на основе программного продукта «ENERGY-INVEST», Зубова М.В., Лазарева О.Н.: Методические указания по дипломному проектированию для студентов специальности 1007 - "Промышленная теплоэнергетика" / КГТУ, Красноярск 2003.
- 6 Справочник по сушке древесины. Под редакцией Е.С. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Лесная промышленность, 1990. 3155
- 7 ГН 2.2.5.1313-03 Предельно-допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
- 8 Вторичные энергетические ресурсы. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Учебное пособие / А.Б. Сухоцкий 2012. С 12-26.
9. Энергосберегающая технология сушки древесины на базе сушильного комплекса, использующие вторичные энергоресурсы В. Алферова, В. В. Бахмутская, О. С. Шведова. С 173-174.