

Н. А. АНДРОНОВА, В. Е. ГРУМ-ГРЖИМАИЛО,
Т. П. ДАГАЕВ, Г. П. ИВАНЦОВ, А. А. ПАРЩИКОВ, А. А. ЧИЖЕВ

674
1986

**СУШКА
И СУШИЛА ДЛЯ ДЕРЕВА**

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

1986

ОНТИ НБТИ СССР

2248902



**КОНТРОЛЬНЫЙ ЛИСТОК
СРОКОВ ВОЗВРАТА**

**КНИГА ДОЛЖНА БЫТЬ
ВОЗВРАЩЕНА НЕ ПОЗЖЕ
УКАЗАННОГО ЗДЕСЬ СРОКА**

Колич. пред. выдач

07.
010'

3 ТМО Т, 3,600.000 З, 1653-9

20

674

С 316

ГУМП НКТП
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ
И РАБОЧИХ ЧЕРТЕЖЕЙ ДЛЯ ЗАВОДОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

СТАЛЬПРОЕКТ

Н. А. АНДРОНОВА, В. Е. ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО, Т. П. ДАГАЕВ,
Г. П. ИВАНЦОВ, А. А. ПАРЩИКОВ, А. А. ЧИЖЕВ

СУШКА И СУШИЛА ДЛЯ ДЕРЕВА

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ТЕКСТ)

224890.

224890.7

[Handwritten signatures and scribbles]

ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ
ЦЕНТРАЛЬНОЕ БИБЛИОТЕЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ЛЕНИНГРАДСКО-ВЕРХАОВСКОЕ

ОНТИ НКТП СССР

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ
МОСКВА 1936 ЛЕНИНГРАД

008122

674.047



АННОТАЦИЯ

Книга подытоживает опыт десятилетней работы Теплового отдела Стальпроекта по проектированию сушил для дерева.

Она состоит из двух частей. В первой части помещены теоретические работы по сушке древесины, теория тепловых расчетов сушил и примеры последних.

Вторая часть (основная) представляет собой альбом полных комплектов рабочих чертежей сушила для дерева периодического действия многократного насыщения с организованным естественным движением воздуха. В основу конструкции положена гидравлическая теория.

Чертежи снабжены небольшой пояснительной запиской.

Книга найдет большое распространение среди хозяйственников, инженеров и техников различных отраслей промышленности, связанных с проектированием, постройкой и эксплуатацией сушил для дерева.

Кроме того книга может служить пособием для студентов лесных ВУЗов и техникумов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
-----------------------	---

Основы гидравлически правильной конструкции сушил

Проф. В. Е. Грум-Гржимайло

О движении воздуха в сушилах	7
Конструкция сушил правильная и сушила-уроды	16
Сушила многократного насыщения, основанные на гидродинамическом принципе	20

Сушка дерева

А. А. Парциков

Сушильные свойства дерева	22
Режим сушки	29
Продолжительность сушки	34
Системы сушил	34
Естественное организованное движение воздуха	34
Некоторые системы современных сушил с гидравлической точки зрения	40
Конструкция сушильных камер	47

Теория и расчет естественной циркуляции в сушилах многократного насыщения

Г. П. Иванцов

Процесс сушила многократного насыщения в $I-d$ -диаграмме	55
Основное свойство естественной циркуляции	61
Теория естественной циркуляции в сушиле	63
О вентиляционной системе сушила для дерева	75

Тепловой расчет камер

Н. А. Андропова, Т. П. Дагаев и А. А. Чижев

Тепловой расчет камер	85
Задание	85
Обработка задания	85
Расчет циркуляции	89
Расчет потери тепла ограждениями	96
Тепловой расчет	102

Характеристика камеры для сушки дерева по отопительной и вентиляционной системам	110
Расчет вентиляционных устройств	114

Управление, контроль и эксплуатация камерного сушила

Н. А. Андропова

Управление работой сушила	123
Контроль состояния воздуха в сушиле	124
Эксплуатация сушила	124

Элементы рабочего процесса туннельных сушил

Г. П. Иванцов и А. А. Чижеев

Процесс в $I-d$ -диаграмме сушила с переменным расходом тепла и воздуха у материала	126
Графическая связь между количеством выпаренной влаги, расходом воздуха и режимом сушки	128
Графическая связь между расходом воздуха, расходом тепла и режимом сушки	135
Удельные расходы тепла и воздуха в туннельном сушиле	140

Сушило непрерывного действия для дерева системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло

Н. А. Андропова и А. А. Чижеев

Область применения	142
Основы конструкции	143
Расчет туннельного сушила длиной 1 м.	147
Расчет двухколейного туннеля длиной 53 м.	154

Инжекционное сушило для дерева

А. А. Чижеев

Область применения	158
Основы конструкции	158
Основы расчета циркуляции в инжекционном сушиле	166
Расчет сушила для особо широких досок авиалесовосы твердых пород, основанный на гидродинамическом принципе	167

Сушка дерева в продуктах горения

А. А. Парциков

Устройство сушильных камер	176
Топочные устройства для сушил	177
Сушила с газогенератором	180
Сушила, работающие на чистом воздухе высокой температуры	183
Схемы сушильных установок	185

ПРЕДИСЛОВИЕ

Режим сушки и система сушила для любого материала *зависят от ряда связанных между собой сушильных свойств* материала, подвергающегося сушке, т. е. от допустимой температуры сушки, теплопроводности, влагопроводности и величины допустимых напряжений, развивающихся в процессе сушки в материале, благодаря неравномерной усадке материала по толщине.

Эта зависимость различна для разных материалов; она меньше при сушке материалов, легко отдающих влагу, деформация которых в сушиле не имеет существенного значения, и наоборот, *зависимость эта имеет решающее значение для материалов массивных, плохо проводящих тепло и влагу, деформация которых в сушиле недопустима*, например, дерева, керамических изделий и пр.

При сушке дерева *особенно необходимо* в сушиле соблюдать такой режим сушки, при котором интенсивность испарения с поверхности соответствовала бы продвижению влаги из внутренних слоев бруска, т. е. чтобы усадка материала происходила равномерно по всей толщине бруска.

Долгое время спорным являлся вопрос, — достаточно ли интенсивная циркуляция создается в сушилах с естественным движением воздуха?

Решением этого основного вопроса занималась и I Всесоюзная конференция по сушке дерева, работавшая в декабре 1929 г.

Тогда конференция высказалась за постройку сушил с естественным движением воздуха.

Движение газов в сушилах для дерева происходит по преимуществу под влиянием разности удельных весов, возникающей при изменении температуры движущихся газов, что является предметом рассмотрения термоаэродинамики¹, значительный этап в развитии которой разработан в гидравлической теории движения газов.

Термоаэродинамика позволила создать совершенную систему сушила для дерева, *организовав* движение воздуха в нем так,

¹ См. сборник работ Стальпроекта „Вопросы движения газов в печах“ ст. Ю. В. Грум-Гржимайло 1936.

что скорость движения воздуха и величина циркулирующего потока в сушиле, как показывает практика, вполне обеспечивают интенсивность испарения с поверхности материала, заданную влажностью последнего равномерно во всем объеме сушила. Сушила эти экономичны, просты в управлении и дешевы в постройке.

Применение организованной естественной циркуляции в сушилах для дерева дало настолько благоприятный результат, что скоро после пуска первых сушильных установок от промышленности начало поступать большое количество заказов на проекты.

Всего с 1928 г. спроектировано свыше 70 сушил на общую годовую производительность 675 000 м³ древесины, считая на 2" сосну. За один 1935 г. разработано 25 проектов сушильных установок.

Большое количество проектов должно быть выполнено и в 1936 г.

Это обстоятельство заставило опубликовать типовые проекты сушил для дерева системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло в виде издания атласа чертежей со всеми расчетами и теоретическими работами, которые были произведены конструкторами Сталь-проекта в связи с развитием этой системы сушил. Вышедший из печати 6 лет назад атлас чертежей б. Древлестроя представляет собой разработку сушил американской системы „National“.

Настоящий атлас содержит в себе уже сушила советской конструкции, значительно более совершенной и экономичной.

В основу ее положены советская теория движения газов и американская практика сушки дерева: режимы сушки Медисоновской лаборатории и элементы конструкции сушил американских систем (конструкции ограждений, дверей, транспорта и пр.).

В разработке конструкции сушил кроме авторов принимали участие инж. И. Н. Кемарский, инж. С. Н. Софронов, конструкторы Г. М. Табаков, Л. З. Беккерман и Е. И. Карягина.

Настоящее издание выходит в двух частях. Первая часть содержит теоретические статьи и расчеты. Вторая часть — атлас рабочих чертежей сушила с пояснительной запиской.

АВТОРЫ

В. Е. Грум-Гржимайло

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИ ПРАВИЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ СУШИЛ¹

О ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В СУШИЛАХ

Быстрая и равномерная сушка легко осуществляется, когда подвергающийся сушке материал совершенно равномерно омывается потоком теплого воздуха. Теплый воздух, омывающий материал, охлаждаясь, делается тяжелее; насыщаясь парами воды, он становится легче. Расчеты показывают, что решающее влияние оказывает утяжеление воздуха вследствие его охлаждения (см. далее „Теория и расчет естественной циркуляции в сушилах многократного насыщения“).

Струйка теплого воздуха, приходящая в соприкосновение с поверхностью влажного предмета, испаряя влагу, насыщается парами воды, стынет и холодная и отяжелевшая падает вниз. Если не препятствовать этому естественному стремлению хо-

¹ Настоящая статья составлена инж. А. А. Парщиковым и Г. П. Иванцовым по следующим материалам:

1. Проф. В. Е. Грум-Гржимайло „Основы правильной конструкции сушил“; напечатана впервые в „Известиях Горного института“, Свердловск, вып. 7, 1920 г., перепечатана в книге „Пламенные печи“, изд. ВТИ, 1925 и 1932 гг.

2. „Принципы работы гидравлически правильно построенных сушил“, опубликовано в трудах БМТК НТУ ВСНХ СССР № 272, 1928.

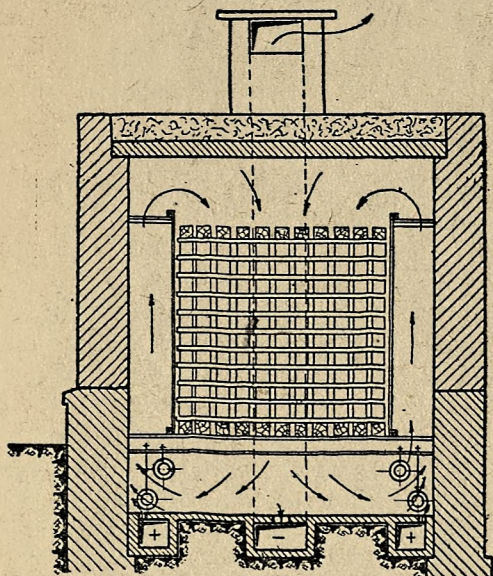
3. Патентные заявки: а) от 25 октября 1920 г. № 74241 на „Сушило многократного насыщения с естественной циркуляцией с нагревательными приборами, расположенными у пола сушила по бокам сушимого материала, отличающееся тем, что наружный воздух подводится через отверстия в канале пола и направляется непосредственно на нагревательные приборы, а отработанный воздух удаляется с пола камеры под сушимым материалом через отверстия вытяжного канала“; б) от 19 января 1927 г. № 13719 на „Сушило многократного насыщения, в котором циркуляция воздуха и отопление производятся при помощи сильно нагретого дутья инжекторами, расположенными у пола сушила и направленными вверх, что вызывает циркуляцию воздуха внутри сушила, с отводом отработанного влажного воздуха с пола“.

В статью включены места из указанных работ, имеющие принципиальное значение и не потерявшие ценности при современном состоянии сушильной техники.

А. Парщиков, Г. Иванцов

лодного, тяжелого, сырого отработанного воздуха падать вниз и вместо него давать в верхнюю часть сушила новые порции легкого, сухого, теплого воздуха, то получится правильно спроектированное сушило *однократного насыщения*. Такие сушила работают хорошо и равномерно сушат, но расход воздуха в них очень значителен: из такого сушила выносятся очень много тепла с теплым отработанным воздухом. Коэффициент полезного действия таких сушил низок.

Гораздо выгоднее повторно подогреть упавшую на пол сушила струю увлажненного воздуха и направлять ее вверх сушила; здесь она вторично придет в соприкосновение с подвешиваемым сушке материалом, увлажнится, остынет и отяжелевшая опустится вниз. Подогревая опять эти струи и направляя их вверх, можно таким образом довести влажность воздуха до обусловленной технологией сушки, например до 40—75—95%, смотря по роду материала, подвергнутого сушке. Насыщенный влажный воздух удаляется из сушила, и взамен его дается в сушило новая порция сухого воздуха.



Фиг. 1. Поперечный разрез сушила для дерева.

Имеются системы сушил, в которых многократное насыщение воздуха достигается принудительной циркуляцией его при помощи вентилятора, который отбирает отработанный воздух из сушила, прогоняет его через калорифер, где воздух нагревается, затем гонит его в сушило, из сушила опять в вентилятор и т. д. На пути циркуляции сырого воздуха часть его удаляется из сушила наружу через специальное отверстие; одновременно засасывается соответствующий объем свежего сухого воздуха. Того же эффекта можно достичь расположением отопительных приборов у пола вдоль стен сушила.

На фиг. 1 в качестве примера изображен поперечный разрез сушила для дерева. При показанном на фигуре расположении нагревательных приборов в сушиле холодная струя воздуха на полу, нагреваясь о поверхность отопительных приборов, делается легкой и поднимается вверх вдоль стен, т. е. осуществляется естественная циркуляция воздуха, заполняющего сушило. Чтобы упорядочить эту циркуляцию и сообщить воздуху надлежащую скорость, по бокам материала, подлежащего сушке, устанавливаются экраны.

В описаниях работающих систем сушил для дерева можно найти указание, что для осуществления энергичной сушки нужно придавать воздуху среднюю скорость на поверхности подвергаемого сушке материала от 0,05 до 0,50 м/сек. Эта скорость может быть осуществлена при естественной циркуляции, импульс которой дается разностью весов столбов подогретого радиаторами воздуха, с одной стороны, и остывающего около материала увлажненного воздуха — с другой. Эта разность весов столбов воздуха порождает скорость циркуляции, величина которой зависит от сопротивлений на пути движения воздуха.

Расчет, подтвержденный многочисленными наблюдениями, показывает, что разность температуры воздуха вверху и внизу сушила ($t_{\max} - t_{\min}$) есть функция сопротивлений, оказываемых циркулирующему в сушиле воздуху:

- 1) материалом, подвергаемым сушке;
- 2) нагревательными приборами (радиаторами);
- 3) пространством под материалом;
- 4) вертикальными боковыми пазухами за экранами;
- 5) пространством над сушимым материалом.

При рационально спроектированном сушиле и правильной укладке подвергаемого сушке материала разность температур вверху и внизу сушил не выходит за пределы нескольких градусов. Такой незначительной разницы температур вверху и внизу сушил уже достаточно, чтобы обеспечить нужную скорость циркуляции воздуха. Чтобы обеспечить надлежащую циркуляцию воздуха в сушиле, оно должно быть спроектировано так, чтобы расстояние материала от стен, потолка и пола было достаточным.

При неправильной и слишком тесной укладке материала и при пережимах струи воздуха у нагревательных приборов разность температур вверху и внизу сушила может достигнуть 10° , что для некоторых материалов уже недопустимо.

Степень насыщения водяными парами воздуха в сушиле зависит от количества сменяемого воздуха. Если удалять из сушила часть увлажненного воздуха, то вместо него поступает равный ему объем сухого наружного воздуха, и влажность воздуха в сушиле понижается; при уменьшении отбора влажного воздуха, — сухого воздуха поступает меньше, и влажность воздуха в сушиле, естественно, повышается. Контроль влажности воздуха в сушиле осуществляется психрометром. Сообразуясь с его показаниями и заданным режимом сушки, количество удаляемого из сушила влажного воздуха регулируют заслонкой (шибером). Приток тепла регулируется по термометру вверху сушила; по показанию контрольного термометра внизу сушила определяется разность температур вверху и внизу. По показаниям термометров можно заранее учитывать равномерность сушки по высоте камеры.

Данные табл. 1 вскрывают природу сушил многократного насыщения.

Таблица 1

Число циркуляций в сушиле в зависимости от температуры t_2 и относительной влажности φ_2 отработанного воздуха и разницы температуры Δt между верхом (t_1) и низом (t_0) (приточный воздух имеет $t_0 = 10^\circ$ и $\varphi_0 = 75\%$)

Отработанный воздух		Разность температур					
$t_2, ^\circ\text{C}$	$\varphi_2, \%$	2°	3°	4°	6°	8°	10°
20°	25	—	—	—	—	—	—
	50	1,5	1,0	—	—	—	—
	75	6,1	4,0	3,0	2,0	1,5	1,2
	90	8,8	5,9	4,4	2,9	2,2	1,8
30°	25	—	—	—	—	—	—
	50	9,9	6,0	4,5	3,0	2,2	1,8
	75	17,2	11,5	8,6	5,7	4,3	3,4
	90	22,2	14,8	11,1	7,4	5,6	4,4
40°	25	7,0	4,6	3,5	2,3	1,7	1,4
	50	21,4	14,3	10,7	7,2	5,3	4,3
	75	35,7	23,8	17,9	11,9	8,9	7,1
	90	44,0	29,4	22,1	14,7	11,0	8,8
50°	25	16,8	11,3	8,4	5,6	4,2	3,4
	50	41,5	27,7	20,8	13,9	10,4	8,3
	75	65,5	43,6	32,6	21,8	16,3	13,1
	90	79,3	52,7	39,6	26,4	19,8	15,8
60°	25	32,0	21,3	16,0	10,6	8,0	6,4
	50	71,0	47,4	35,6	23,7	17,8	14,2
	75	109,2	72,7	54,7	36,5	27,3	21,8
	90	131,0	87,2	65,3	43,5	32,8	26,2
70°	25	53,0	35,3	26,4	17,6	13,2	10,6
	50	115,0	76,2	57,5	38,3	28,7	23,0
	75	173,0	115,0	86,5	57,8	43,3	34,7
	90	207,0	138,0	103,0	69,0	51,8	41,4
80°	25	83,5	55,8	42,0	27,9	21,0	16,7
	50	353,0	118,5	88,6	59,2	44,4	35,4
	75	262,0	175,0	131,0	87,5	65,5	52,5
	90	312,0	208,0	156,0	104,0	77,8	62,2
90°	25	126,0	84,5	63,0	42,0	31,6	25,3
	50	361,0	174,0	130,0	87,0	65,2	52,2
	75	384,0	256,0	192,3	128,5	96,3	76,9
	90	445,0	297,0	223,0	149,0	111,0	89,0

Таблица подсчитана по формуле

$$n = \frac{d_2 - d_0}{\Delta d},$$

где d_0 — влагосодержание свежего воздуха,
 d_2 — влагосодержание отработанного воздуха и
 Δd — приращение влагосодержания.

Например при температуре 70° сушки фруктов, овощей и пр. и 4° разности температур внизу и вверху сушила и влажности отработанного воздуха 75% сухой воздух должен пройти мимо сушимых изделий 86,5 раза и столько же раз подогреваться нагревательными приборами, которые непрерывно гонят этот воздух вверх и заставляют его многократно работать. Здесь мы имеем удачное использование сил природы, делающих нужную нам работу без затраты лишней энергии. Циркулирующий объем в сушиле в 86,5 раза больше того объема влажного воздуха, который удаляется из сушила эксгаустером, что дает для наших сушил колоссальную экономию в энергии, расходуемой на сушку.

Равномерность сушки достигается сама собой, что ясно из нижеследующего. Действительно, представим себе на материале два рядом расположенных участка по 1 см^2 : один сухой и другой сырой, находящиеся в непосредственном соседстве; струйки омывающего их теплого воздуха поведут себя совершенно различно: струйка теплого воздуха у сырого участка испарит его влагу, насытится, остынет, отяжелеет, упадет вниз и будет заменена новой теплой струйкой; теплая струйка у сухого участка не изменит ни своего состава, ни температуры, а потому останется неподвижной. Таким образом циркуляцию теплого воздуха вниз вызывают только сырые участки материала, в то же время они сохнут и догоняют сухие участки, не вызывающие никакой циркуляции. По характеру — это очень мягкая и вместе с тем энергичная сушка.

Вследствие меньшей влажности и более высокой температуры циркулирующего воздуха вверху условия сушки внизу и вверху сушила существенно различны: вверху осуществляется более резкая сушка, внизу — более мягкая. Верхняя часть материала всегда несколько опережает нижнюю: к концу сушки эта разница выравнивается. Эту особенность сушил многократного насыщения с естественной циркуляцией следует учитывать при ответственной сушке, например при сушке семенного хлеба; то же касается сушки и ряда других материалов.

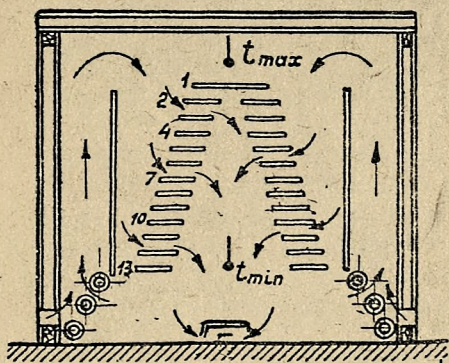
При одновременной сушке различных по размерам и форме изделий (особенно керамических) они должны укладываться в сушиле с учетом разной интенсивности сушки вверху и внизу.

При проектировании сушила следует также учитывать возможность запаривания материала, т. е. конденсацию паров воды на вновь вводимом в сушило холодном сыром материале. Этого можно избежать, если приемную часть сушила, куда вводится вагон с холодным, сырым материалом, оборудовать большим числом нагревательных приборов.

Чтобы ослабить явление запаривания необходимо, располагать сушимый материал так, чтобы он нагревался возможно скорее. Это достигается такой укладкой его, чтобы вертикальная циркуляция воздуха могла осуществляться беспрепятственно. Дрова, например, надо располагать стоймя, ткань — подвешивать,

решета — располагать стопами с широкими промежутками между последними и т. д. Плотное расположение материала, подвергаемого сушке, затрудняет вертикальную циркуляцию, а неправильное расположение отопительных устройств вызывает запаивание и порчу материала.

В некоторых типах сушил применяются вентиляторы, поставленные внутри сушил, для возбуждения циркуляции воздуха. В гидравлически правильно построенных сушила установка вентиляторов не только бесполезна, но и вредна, потому что струя воздуха, подаваемого вентилятором внутрь сушила, мешает естественному опусканию, отяжелевших, холодных струй вниз — условию, гарантирующему равномерность сушки по всему сечению сушила.



Фиг. 2. Сушка горизонтальных поверхностей.

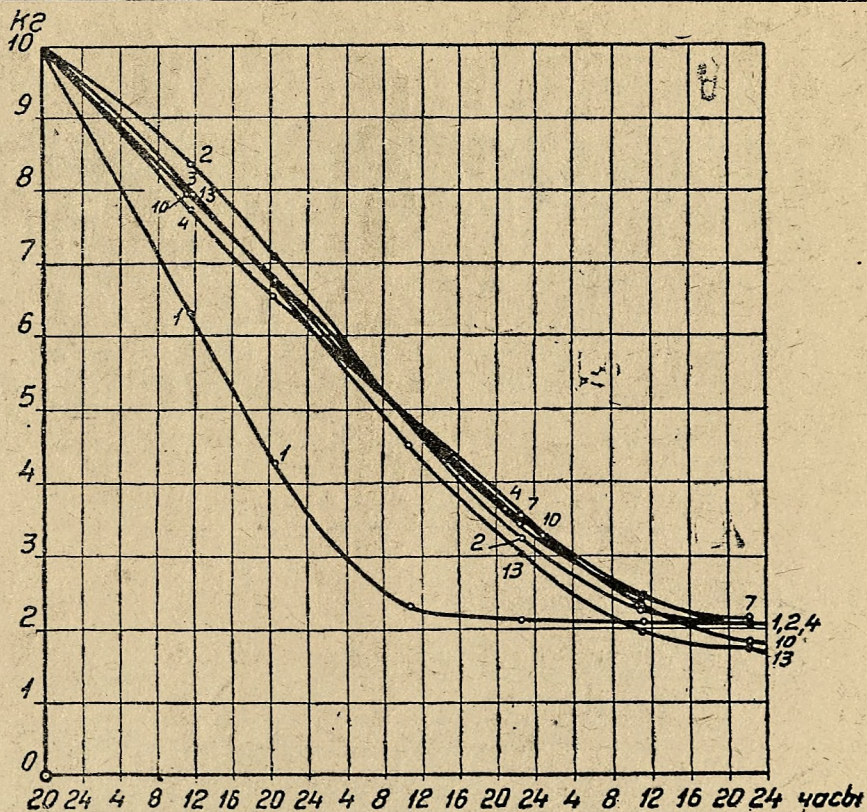
Естественная циркуляция в гидравлически правильно спроектированных сушила дает идеальное решение вопроса о равномерности сушки, так как она строго согласована с законами природы и легко подчиняется математическому расчету.

Из предыдущего схематического описания сушил ясно, что при расположении приборов отопления вдоль стен сушила в последнем возбуждается вертикальная циркуляция остывающего сырого воздуха вниз и теплого воздуха в паузах за

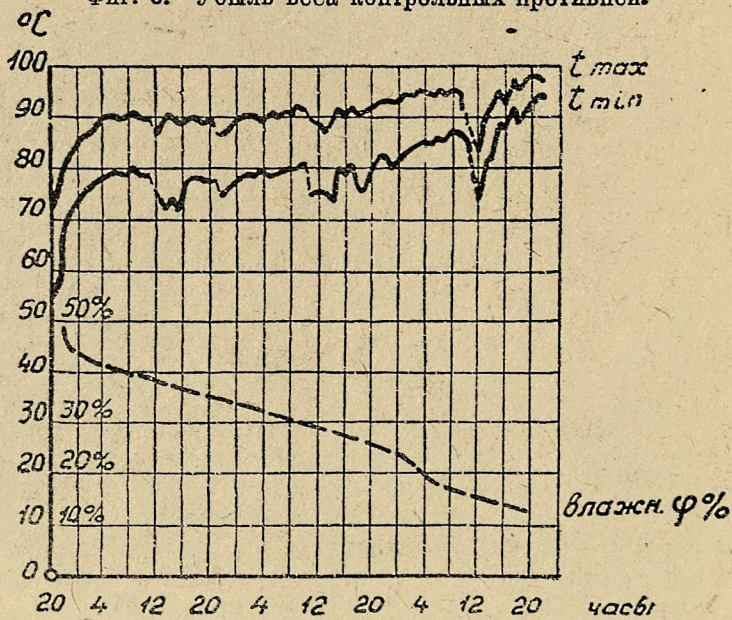
экранами — вверх. Поэтому целесообразна укладка материала с вертикальными проходами.

На фиг. 2 показана схема сушки горизонтальных поверхностей, на которой в качестве примера приведено сушило для красителей. Результаты работы этого сушила приведены на фиг. 3. На диаграмме дана убыль веса в процессе сушки контрольных образцов, нумерация которых соответствует фиг. 2.

Верхний противень этого сушила (фиг. 2), омываемый сухим сравнительно воздухом, опережает все остальные. Это естественно и неизбежно при принятой системе укладки материала. При энергичной сушке первого противня воздух столь насыщается парами воды, что задерживается сушка второго противня, и лишь когда высыхает первый противень, начинается энергичная сушка второго противня. В итоге, на всех сковородах краска высыхает равномерно. На сушку в этом сушиле потребовалось всего 72 часа против 144 час. для старых сушил, где часто приходилось переставлять противни вследствие неравномерной сушки. На фиг. 4 приведена запись максимальной и минимальной температур; разность их держится в пределах 10 и доходит до 3°.



Фиг. 3. Убыль веса контрольных противней.



Фиг. 4.

Перейдем к вопросу о наиболее выгодной температуре воздуха, удаляющегося из сушила. Назовем отношение количества тепла в паре влажного воздуха ко всему количеству тепла во влажном воздухе „коэффициентом полезного действия сушики“. Это — величина, несколько большая „коэффициента полезного действия сушила“, так как не приняты в расчет расход на нагрев сушимого материала до температуры сушики и лучеиспускание стен сушила.

Табл. 2, вычисленная для случая 75-процентной влажности, дает совершенно определенный ответ на поставленный вопрос. К. п. д. сушики тем выше, чем выше температура воздуха, покидающего сушило, конечно, при условии максимально возможного для данной температуры насыщения воздуха влагой. Такой парадоксальный на первый взгляд вывод объясняется весьма быстрым увеличением влагоемкости сухого воздуха с повышением температуры.

Таблица 2

Температура внизу сушила t_{\min} °C	Теплосодержание, Кал			Всего кал	К. п. д. сушки %
	сухого воздуха в 1 м ³ смеси при насыщении 75% и давлении 1,0333 кг/см ²	пара, содержа- щегося в 1 м ³ сырого воздуха при насыщении до 75% и давлении смеси 1,0333 кг/см ²			
10	2,868	4,141	7,009	59	
20	5,519	7,690	13,209	58	
30	7,890	13,631	21,521	63	
40	9,943	53,107	33,050	70	
50	11,579	37,770	49,349	77	
60	12,648	59,816	72,464	83	
70	12,926	91,714	104,640	88	
80	12,120	136,826	148,956	92	
90	9,826	198,950	208,772	95	

Само собой понятно, что к. п. д. сушики тем выше, чем больше степень влажности отработанного воздуха. Вычислим для примера зависимость к. п. д. сушики от степени влажности отработанного воздуха при $t_{\min} = 55^\circ$; получим табл. 3, из которой следует, что сушить выгоднее при полном 100-процентном насыщении парами воды отработанного воздуха. Практика показывает, что это невозможно. При местном понижении температуры в некоторых углах сушила ниже точки росы сушимый материал в этих местах „распаривается“ и теряет свои качества.

В технологии сушики играет большую роль вопрос о степени влажности воздуха, циркулирующего в сушиле. Некоторые материалы, например бездымный порох, при резкой сушке дают корочку, которая негигроскопична и потому понижает эффект

Относительная влажность воздуха, покидающего сушило при температуре $t_{\min} = 55^{\circ}$ %	Теплосодержание, Кал			К. п. д. сушки %
	воздуха в смеси при общем давлении смеси 1,0333 кг/см ² при температуре 55°	пара в смеси при общем давлении смеси 1,0333 кг/см ² при температуре 55°	всего	
10	13,559	6,114	19,673	31
20	13,345	12,303	25,648	48
30	13,133	18,567	31,700	58
40	12,919	24,906	37,825	66
50	12,705	31,320	44,025	71
60	12,493	37,869	50,362	75
70	12,279	44,438	56,712	78
80	12,065	51,107	63,172	81
90	11,986	57,785	69,771	83
100	11,639	64,573	76,212	85

сушки. Порох, заключенный в такой корочке, просыхает очень медленно. Чтобы замедлить сушку поверхности в сушилах однократного насыщения к теплу воздуха прибавляют пар. В этом случае выгоднее один и тот же воздух прогонять через нагревательный прибор многократно, обращая установку в сушило многократного насыщения с принудительным движением воздуха при помощи вентилятора. В этом случае увлажнение воздуха, циркулирующего в сушиле, происходит за счет возвращаемой в сушило части влажного отработанного воздуха.

Характерным примером правильного применения естественной циркуляции являются сушила для дерева. При сушке дерева особенно благоприятно сказалось то обстоятельство, что мы не применяем в наших сушилах вентиляторов. Когда сушка затягивается на месяцы, например при сушке крупного дуба, содержание вентилятора в других системах сушил ложится крупным расходом, и естественная циркуляция получает все преимущества. При естественной циркуляции внутри сушила получается минимальный расход энергии на сушку. С другой стороны, удаление отработанного воздуха с максимальной по условиям технологии сушки степенью насыщения парами воды гарантирует минимальный по условиям сушки расход тепла на испарение влаги. В итоге в сушилах с естественной циркуляцией получается такое удешевление сушки, с которым другим системам невозможно конкурировать.

Таким образом мы нашли правильную конструкцию сушил многократного насыщения с естественной циркуляцией, возбуждаемой разностью удельных весов столбов воздуха, циркули-

рующего в сушиле между нагревательными приборами и материалом, подвергаемым сушке.

Конструкция сушила отличается совокупностью следующих признаков:

1) расположением нагревательных приборов любой конструкции в нижней части, у пола сушила и по бокам сушимого материала;

2) наличием свободного пространства над нагревательными приборами;

3) наличием свободного пространства над и под подвергаемым сушке материалом;

4) расположением материала, допускающим вертикальную циркуляцию воздуха;

5) удалением отработанного воздуха с пола сушила;

6) подачей свежего воздуха в сушило на нагревательные приборы;

7) отсутствием каких-либо механических побудителей циркуляции воздуха.

КОНСТРУКЦИЯ СУШИЛ ПРАВИЛЬНАЯ И СУШИЛА-УРОДЫ

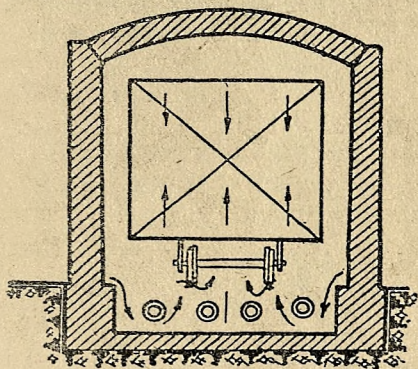
Самой распространенной ошибкой в конструкции сушил является отвод отработанного влажного воздуха сверху. При такой конструкции сушила сухой теплый воздух скорее удаляется в трубу, чем остывший, насыщенный влагой, и сушка идет очень неравномерно. В полости сушила воздух идет по пути наименьшего сопротивления, и образуются мертвые углы (мешки) застойных газов, где материал не сушится, а лишь распаривается. Правильная равномерная сушка возможна только при омывании материала *нисходящим* потоком теплого газа по всему сечению, т. е. при так называемой „обращенной тяге“. На основании изложенного в данном труде оставляется без рассмотрения большинство принятых на практике сушил, так как в основу их взят ложный принцип.

Первое правило, которому должно удовлетворять правильно построенное сушило, состоит в том, что отработанные газы отводятся снизу.

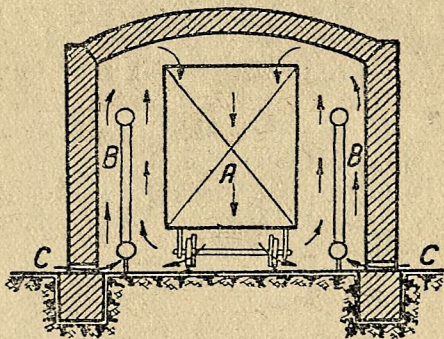
Из описания правильной конструкции сушила совершенно очевидна ошибка, допущенная Клячиным в сушиле при углевыжигательной печи его конструкции (фиг. 5). Он располагает нагревательные приборы в яме под рельсами. Очевидно, что поток нагретых газов поднимается навстречу стекающему вниз потоку остывших между дровами отработанных струй, и правильная циркуляция в сушиле установиться не может, следовательно, невозможна правильная сушка дров (а стало быть, и равномерное углежжение).

Трубы отопления B_1B в сушиле, схема которого приведена на фиг. 6, должны, очевидно, быть поставлены по сторонам поезда вагонеток A . Подаваемые в нижнюю часть сушила остыв-

шие влажные печные газы (или воздух — при сушке воздухом) нагреваются и вдоль стен поднимаются вверх к своду, затем опускаются, омывая подвергаемый сушке материал, насыщаются парами воды, падают на пол камеры, опять нагреваются трубами *В, В* и таким образом циркулируют сверху вниз по середине камеры и снизу вверх — по бокам.

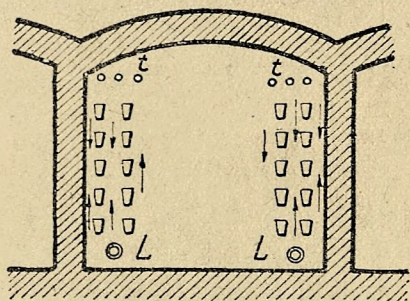


Фиг. 5. Сушило Клячина при углевыжигательной печи.

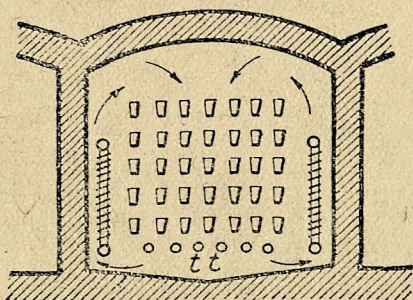


Фиг. 6. Схема циркуляции воздуха в сушиле.

Сушило большой производительности должно быть сделано по возможности более просторным, только тогда в нем может установиться правильная циркуляция, достаточно мощная, чтобы обеспечить заданную производительность сушила.



Фиг. 7. Сушило Ижевского завода для сушки тиглей.



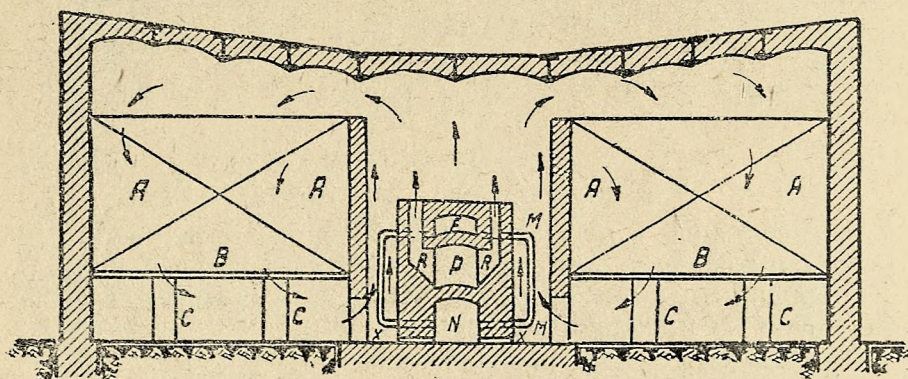
Фиг. 8. Правильная конструкция инжекционного сушила.

Для эффективной сушки дрова в сушиле надо располагать стоймя. Дно вагонов надо делать решетчатым. Эти требования не соблюдены в сушилах углевыжигательных печей Аминова и Гренделя.

Конденсаторное сушило Ижевского завода для сушки тиглей для плавки стали (фиг. 7) работает без вентиляции. Влага воздуха, заполняющего сушило, осаждается на конденсационных трубах *t, t*, расположенных у свода сушила; в этих трубах цир-

кулирует холодная вода; воздух подогревается трубами парового отопления L, L . Циркуляция воздуха в этом сушиле не организована, так как в этой конструкции горячие струи направляются кверху, навстречу влажным струям остывшего воздуха, кроме того трубы t, t охлаждают теплый воздух, собирающийся наверху. Правильная конструкция конденсационного сушила показана на фиг. 8, в которой конденсационные трубы расположены внизу.

Проект сушила для столярного леса. Неравномерность омывания досок теплыми струями воздуха вызывает появление трещин, портящих лес. Их можно избежать при правильном омывании досок нисходящими струями циркулирующего в сушиле воздуха. На фиг. 9 дана схема сушила с двумя штабелями досок (А,А). Доски укладываются аккуратно, чтобы сквозь весь штабель проходили вертикальные каналы в ширину доски, что



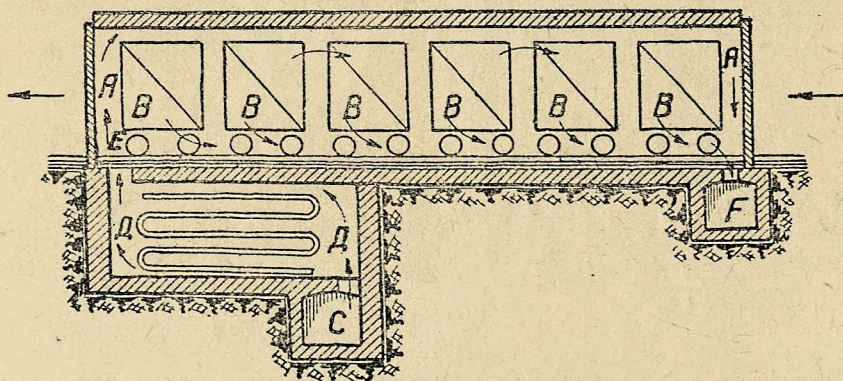
Фиг. 9. Схема сушила с двумя штабелями.

обеспечивает беспрепятственное опускание остывающего влажного воздуха. Штабеля досок сложены на прогонах B, B , опирающихся на выступы стен и кирпичные столбы C, C в рост человека; остывающий влажный воздух может свободно циркулировать под штабелем по направлению к воздухонагревателю с металлическими трубами, поставленному в среднем отделении сушила. Воздухонагреватель состоит из топки и канала F , из которого топочные газы по трубам M, M равномерно по длине сушила поступают в дымовой бороз N , а из него — в дымовую трубу.

Холодный воздух вступает в канал P и нагретый в каналах R, R выходит в сушило, поднимается кверху, омывая доски, насыщается влагой, опускается через вертикальные колодцы в штабелях, омывает трубы M, M , согревается и поднимается опять вверх, осуществляя таким образом многократную циркуляцию. Самый холодный влажный воздух стелется по полу сушила. Тут он через отверстия X, X поступает в дымовой бороз N и уносится в дымовую трубу.

Для сравнения работы сушил однократного и многократного насыщения рассмотрим работу сушила Лемана. Прекрасная по оборудованию крахмалосушилка Лемана (фиг. 10) работает весьма неудовлетворительно лишь потому, что насыщение в ней газа происходит только один раз. Устройство ее таково: в коридоре *А,А* движутся вагонетки *В,В* с сырым крахмалом на решетках. Вентилятор нагнетает холодный воздух через канал *С* в камеру, где расположены трубы парового отопления. Через отверстие *Е* теплый воздух вступает в коридор *А,А* и поднимается под его свод. Насыщенный парами воды остывший воздух удаляется с пола через канал *Е*.

Расчет этого сушила, если не принимать во внимание потери на лучеиспускание, может быть сделан так: сухой воздух, нагретый до 50° , несет в себе количество тепла, равное $11,9 \text{ Кал/кг}^1$: воздух 75-процентной относительной влажности содержит при



Фиг. 10. Крахмалосушка Лемана.

20° $11,56 \text{ Кал/кг}^1$. Следовательно, температура отработанного воздуха (без потерь на лучеиспускание и расхода тепла на нагрев крахмала и вагонеток) будет несколько выше 20° , а при учете потери на лучеиспускание и на нагрев крахмала и вагонеток — несколько ниже 20° . Будем считать ее в 20° , тогда 1 кг сухого воздуха из сушила выносит $0,0118 \text{ кг}$ воды¹. Полезный коэффициент сушки определяется по табл. 2 в 58% .

Количество холодного воздуха, которое должно быть подано в сушило для удаления 1 кг воды из крахмала, будет равно $1 : 0,0118 = 85 \text{ кг}$.

В сушиле многократного насыщения при той же температуре вступающего в сушило воздуха (50°) и температуре отработанного воздуха 40° и 75-процентной относительной влажности воздуха к. п. д. сушки будет 70% . Количество сухого воздуха на 1 кг испаренной влаги крахмала уменьшится до $1 : 0,0367 = 27,3 \text{ кг}$,

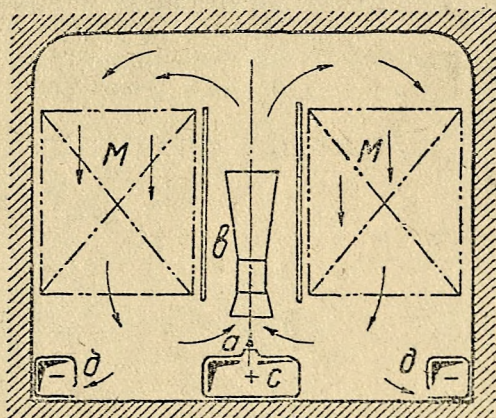
¹ По таблице параметров влажного воздуха, стр. 78.

где $0,0367 \text{ кг}$ — влагосодержание воздуха при 40° и $\varphi = 75\%$.

Из этого примера видна выгода сушил многократного насыщения. К. п. д., как мы видели выше, поднимается, а следовательно расход тепла на нагрев воздуха сокращается в $70:58 = 1,2$ раза, а количество воздуха в $91,8:27,9 = 3,3$ раза.

Какова же должна быть конструкция коридорного сушила многократного насыщения?

Сила, движущая циркулирующий объем, есть функция разности удельных весов газов при максимальной и минимальной температурах и не может быть значительной, а поэтому и скорость циркуляции не может быть большой. Отсюда ясно, что



Фиг. 11.

циркуляция газов в сушиле должна совершиться в направлении, обеспечивающем для струи циркулирующих газов максимальную площадь сечения (наименьшее сопротивление). Для коридорного сушила это будет циркуляция в плоскости, перпендикулярной к длине сушила, как показано на фиг. 6, где плоскостью циркуляции является плоскость чертежа. Максимальная площадь сечения камеры — горизонтальная. Эта площадь должна быть настолько широка, чтобы сечение промежутков между вагонами и стенами камеры удовлетворяло условию свободного движения циркулирующих по ним газов. Тому же условию должно удовлетворять и расположение решет с крахмалом на вагонетках B, B (фиг. 10). Решета надо располагать стопами с большими промежутками между ними. Такое устройство коридорного сушила обеспечивает правильную циркуляцию, показанную стрелками на фиг. 1, 6 и 8.

СУШИЛА МНОГОКРАТНОГО НАСЫЩЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПРИНЦИПЕ.

При утилизации тепла отходящих газов заводских печей часто можно получить за вентилятором газы при температуре

300—400° и значительном давлении. Чтобы использовать эти газы для сушки, нужно понизить их температуру до рабочей температуры в сушиле, т. е. обычно до нескольких десятков градусов. Это можно сделать, примешивая горячие газы к остывшему влажному воздуху с помощью эжектора ($a—b$, фиг. 11), подсасывающего многократный объем влажного воздуха снизу сушила.

Горячие газы или нагретый воздух подаются в сушило через канал c ; удаление влажного воздуха из сушила происходит через каналы g, g , соединенные с вытяжной трубой; M, M — материал, подвергаемый сушке.

Такое сушило работает с более усиленной циркуляцией по сравнению с сушилами, снабженными нагревательными приборами с естественной циркуляцией воздуха. Здесь помимо гидростатического напора, за счет которого происходит движение воздуха в сушилах с естественной циркуляцией, используется и кинетическая энергия струи горячего воздуха или газа, за счет которой и происходит усиленная циркуляция.

СУШКА ДЕРЕВА

СУШИЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ДЕРЕВА

Процесс сушки есть процесс испарения влаги из материала. Сушка массивного материала, каким является дерево, — процесс очень сложный и мало изученный, особенно в отношении сушильных свойств материала. Под сушильными свойствами материала мы понимаем всю сумму тех физических и химических свойств его, знание которых необходимо для выработки научно обоснованного режима сушки и разработки рациональной системы сушила.

Явления, происходящие в материале во время сушки, разделяются на явления, связанные с продвижением влаги в материале, и на явления испарения ее с поверхности. При сушке тонких немассивных материалов, легко отдающих влагу (текстильные, сыпучие), течение процесса сушки зависит, главным образом, от испарения с поверхности. Дерево относится к числу массивных материалов, процесс сушки которых определяется по преимуществу явлениями, сопровождающими процесс продвижения влаги изнутри материала к поверхности.

Действие горячего воздуха в сушиле вызывает в материале повышение температуры до некоторой $t_{\text{мат}}$, а также испарение влаги с поверхности его с некоторой интенсивностью, $W_{\text{г/м}^2 \cdot \text{час}}$ при данной влажности материала.

При сушке тонких материалов обычно задается лишь максимальное значение температуры материала, отдача же влаги может быть очень велика, и поэтому при проектировании сушила для такого материала срок сушки определяется экономическими и конструктивными соображениями. При сушке массивных материалов, в частности дерева, режим сушки, т. е. температура и коэффициент φ воздуха, омывающего материал, обычно задается в зависимости от влажности древесины в данный момент. На таком принципе основаны американские режимы сушки.

Заданным температуре и коэффициенту φ воздуха соответствует определенное парциальное давление водяных паров в нем, а температуре материала и влажности его соответствует парциальное

давление паров на его поверхности. Разность этих парциальных давлений в свою очередь определяет интенсивность испарения влаги с поверхности материала.

Таким образом с точки зрения материала режим сушки может быть задан в виде интенсивности испарения влаги с его поверхности, в зависимости от температуры и влажности материала. Так, одну и ту же интенсивность испарения можно получить при омывании материала сухим воздухом с малой скоростью, и воздухом очень влажным, близким к равновесному состоянию, отвечающему данной температуре и влажности материала (см. фиг. 5), но с большой скоростью; поведение материала в обоих случаях будет одинаково.

Температура сушки материала зависит от назначения его, т. е. от тех условий, в которых будет работать изделие из этого материала. Так например, к дереву, идущему на самолетостроение и для обоза, т. е. туда, где оно несет силовую нагрузку, предъявляются в первую очередь требования высоких механических свойств. Имеющиеся в настоящее время данные показывают, что применение высоких температур сушки вредно отражается на механических свойствах дерева, следовательно, при сушке силового материала предельная температура материала задается изменением механических свойств материала.

При сушке малоответственного строительного материала максимальная температура повышается и предел ее определяется, в конечном счете, началом разложения древесины. Чем выше температура материала, тем легче происходит диффузия влаги от сердцевины к периферии и тем интенсивнее может производиться сушка.

Конечная влажность материала зависит от атмосферных условий, в которых будет работать изделие; влага в изделии должна находиться в равновесии с воздухом атмосферы для того, чтобы не происходила сушка или увлажнение древесины и сопровождающее их изменение формы изделия.

Другое требование, предъявляемое почти ко всем сколько-нибудь ответственным материалам,—это отсутствие напряжений в материале, которые могут вызвать деформацию изделия; отсутствие трещин и свищей. Все это определяет допустимую интенсивность испарения с поверхности.

Разберем явления, связанные с продвижением влаги в материале. По мере подсыхания наружных слоев в древесине возникает ток влаги из середины к поверхности, вызываемый различной влажностью. Высыхание ниже точки насыщения волокна вызывает усадку материала, причем наружные слои как менее влажные в момент сушки, имеют большую усадку, чем внутренние, влажные. Это обстоятельство в свою очередь вызывает появление напряжений в материале, которые при достижении временного сопротивления вызывают разрывы материала.

Следовательно, процесс сушки определяется тремя факторами: теплопроводностью материала, усадкой и механическими свой-

ствами (упругостью) материала. Влагодпроводность зависит от температуры и влажности материала, и кроме того, некоторые данные показывают, что на влагодпроводность влияет также наличие теплового потока в материале (влага перемещается от более нагретой части образца к менее нагретой). Усадка зависит от влажности материала, от действия высокой температуры и наличия в материале внутренних напряжений. Продолжительное воздействие внутренних напряжений может вызвать остаточные деформации и изменить нормальную величину усадки. Наконец, механические свойства материала зависят также от влажности материала.

Анализ влияния этих факторов на сушку показывает следующее. Если бы материал не имел усадки при сушке и влагодпроводность его была бы величиной постоянной, то такой материал можно сушить очень резко и срок сушки его всецело определяется величиной влагодпроводности материала. Как указано выше, влагодпроводность материала зависит от температуры и влажности и с уменьшением их падает. При резкой сушке поверхностные слои материала пересушиваются, в значительной мере теряют свою влагодпроводность, и сушка замедляется. Оптимальная интенсивность сушки определяется условием, что влажность наружных слоев материала не должна падать ниже определенной величины.

Материал с большой усадкой, с нормальными механическими свойствами и идеальной влагодпроводностью, в котором не может появиться значительный перепад влажности, можно также сушить резко. То же самое можно сказать относительно материала, имеющего плохую влагодпроводность и большую, одинаковую во всех направлениях усадку, но обладающего хорошей упругостью и механической прочностью, — внутренние напряжения при сушке в этом случае не вызывают разрывов материала.

Из всего сказанного следует, что режим сушки массивного материала зависит от соотношения всех перечисленных факторов, а не от какого-либо одного из них, и поэтому все они должны быть учтены в равной мере.

Перейдем к рассмотрению процесса испарения с поверхности материала. Закон, установленный Дальтоном в 1803 г., гласит, что интенсивность испарения пропорциональна разности парциальных давлений водяных паров на поверхности материала и в воздухе:

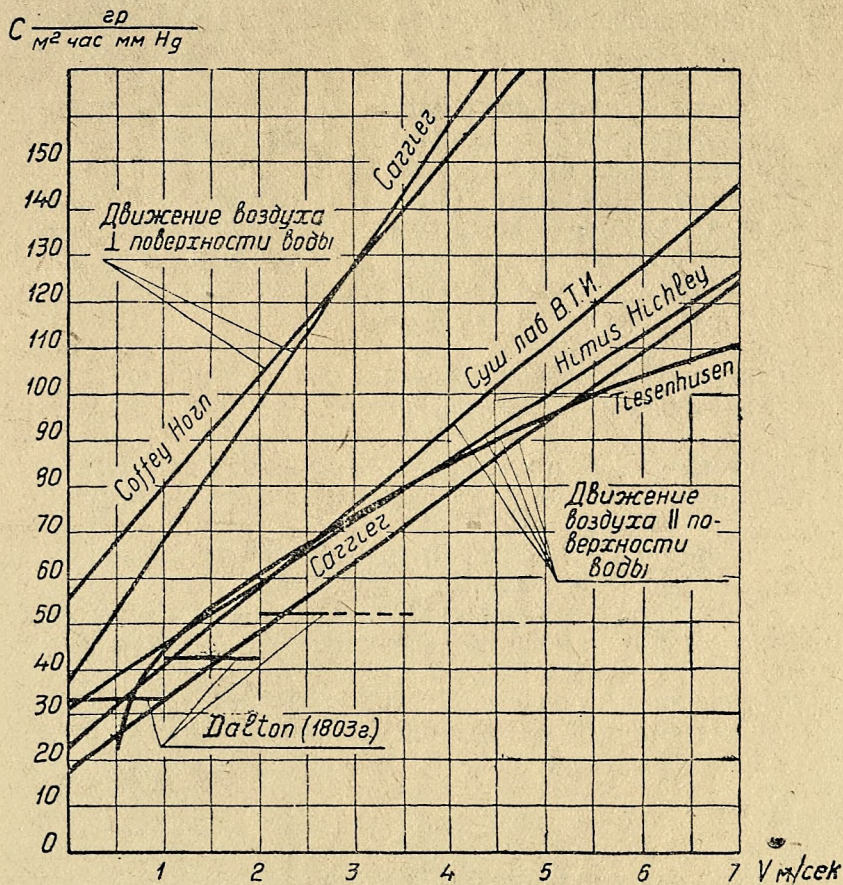
$$W = C (H - h) \rho / m^2 \cdot \text{час}$$

где H и h — парциальные давления водяного пара на поверхности материала и в воздухе, выраженные в мм рт. ст.; C — коэффициент, зависящий от характера и скорости движения воздуха, омывающего материал, и в меньшей степени от особенностей данного материала¹.

¹ Часто формулу Дальтона пишут в форме $W = C (H - h) \cdot \frac{760}{B}$, где B — барометрическое давление. Поскольку часто неизвестен даже порядок величин,

На фиг. 1 дан график значений коэффициента C по данным различных авторов, заимствованный из книги инж. М. Ю. Лурье „Сушильное дело“; этот график дополнен значениями C , предложенными Дальтоном. Эти значения неплохо совпадают с результатами последних исследований.

Обращает внимание следующее важное обстоятельство: все прямые пересекают ось ординат выше начала координат, откуда



Фиг. 1. Кривая зависимости скорости движения воздуха на интенсивность испарения.

следует, что эффект от увеличения скорости воздуха у материала (в области небольших скоростей, которые обычно имеют место в рабочем пространстве сушила) не так уж велик.

Так например, при переходе от $v = 0,5 \text{ м/сек}$ к $v = 1,5 \text{ м/сек}$, т. е. при увеличении скорости в три раза, а всех напоров в девять раз, интенсивность испарения при прочих равных условиях

входящих в формулу, постольку вводить поправку на барометрическое давление пока преждевременно.

возрастает лишь на 50%. Повышение скорости выгодно в отношении увеличения равномерности сушки, но это уже относится к расчету циркуляции в камере¹.

Парциальное давление паров воды в воздухе h при данном барометрическом давлении зависит только от влагосодержания воздуха. h определяется по $I-d$ -диаграмме.

При испарении со свободной поверхности жидкости тончайший слой воздуха у самой ее поверхности имеет температуру жидкости и 100% насыщения. В этом случае H на поверхности жидкости равно давлению насыщения паров воды в воздухе при температуре жидкости.

При испарении с поверхности древесины давление паров у поверхности материала меньше давления насыщения при температуре материала и зависит от его влажности. Оно определяется по линиям равновесия (фиг. 5). Например если температура дерева 15° и влажность 13%, то парциальное давление водяных паров H на его поверхности будет то же, что и воздуха, находящегося в равновесии с материалом, имеющим ту же температуру $t = 15^\circ$ и $\varphi = 66\%$; при этом по $I-d$ -диаграмме $h = H = 7$ мм. в. ст. и $W = 0$.

При подсчетах необходимо помнить, что это будет относиться к поверхностному слою дерева, который всегда суше внутренних слоев.

Из сказанного выше становится ясной последовательность работы определения научно обоснованного режима сушки материала.

1. В лаборатории исследуются: влияние температуры на механические свойства материала, усадка и влагопроводимость. В результате определяются оптимальные температуры материала и интенсивность испарения с поверхности его. Цифры эти даются при нескольких влажностях материала по мере сушки.

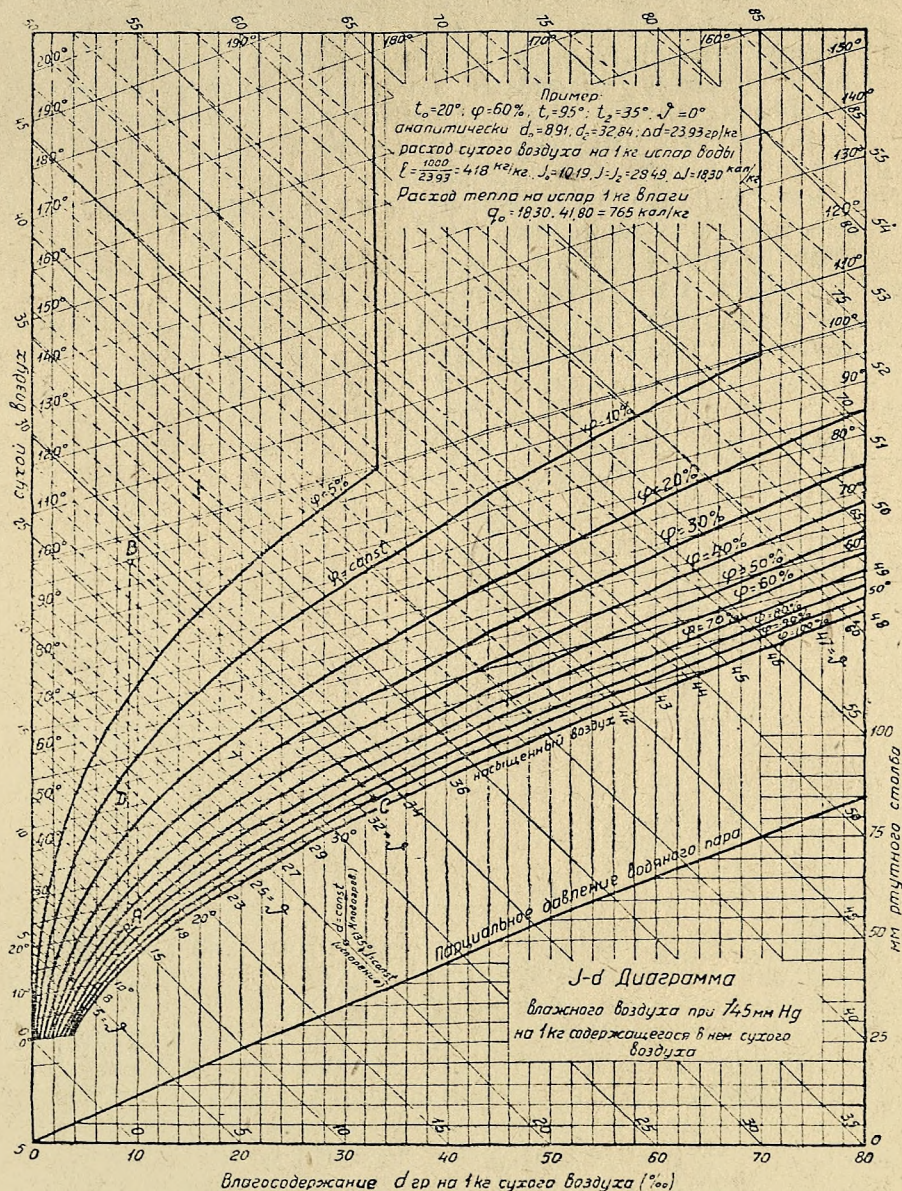
2. Далее, для каждого состояния материала по графику устойчивой влажности (фиг. 5) определяется влажность воздуха при температуре материала, находящегося в равновесии с материалом.

3. По $I-d$ -диаграмме (фиг. 2) находится парциальное давление паров воды в воздухе, имеющем равновесную влажность. Как указывалось, это давление будет равно парциальному давлению на поверхности материала.

4. По той же $I-d$ -диаграмме с нанесенными на ней линиями одинаковых пределов охлаждения влажного материала ($\vartheta = \text{const}$, где ϑ — температура материала) определяем искомые значения φ влажности и t° воздуха в сушиле. Для этого в $I-d$ -диаграмме отмечаем точку материала, соответствующую $t_{\text{мат}}$ и H мм рт. ст. Все состояния воздуха в сушиле, при которых температура материала не будет меняться и будет соответствовать заданной, лежат на линии пределов охлаждения, проходящей через эту точку.

¹ См. статью инж. Г. П. Иванцова стр. 55.

5. На этой линии пределов охлаждения должна быть выбрана точка состояния воздуха, соответствующая необходимой разности $(H-h)$ в формуле Дальтона, которая в свою очередь обеспечивает заданную интенсивность испарения W .



Фиг. 2. $I-d$ -диаграмма с нанесенными на ней линиями $\varphi = \text{const}$.

Выбор той или иной точки на этой прямой зависит от характера движения воздуха при сушке, от коэффициента C в формуле

Дальтона. Если характер потока воздуха создает благоприятные условия для испарения, если можно принять коэффициент C большим, то мы можем сушить материал в атмосфере воздуха меньшей температуры, более влажной, h которого близок H материала. В случае малого значения C , когда воздух в сушиле у материала движется медленно, для достижения того же W необходимо увеличить температуру воздуха.

Таким образом одинаковые значения величины W , одинаковую скорость сушки, можно получить, ведя процесс в потоке влажного воздуха, омывающего материал с большой скоростью, температура которого несколько выше температуры материала, или в потоке более горячего сухого воздуха, омывающего материал с меньшей скоростью.

Равномерность сушки во всем рабочем пространстве сушила, экономичность и простота конструкции сушильной установки, — все это зависит от правильного выбора соотношения скорости и состояния воздуха в пределах, получаемых по формуле Дальтона.

Разберем пример „иллюстрирующий приведенный метод; проверим режим сушки сосновых досок толщиной 2“.

Цифры для примера взяты нами из испытания сушил системы В. Е. Грум-Гржимайло на Ростовском сельмашзаводе. Испытание было проведено б. Институтом древесины (табл. 1).

Таблица 1

Период сушки	Влажность материала (ср. abc) %	Температура воздуха °С	Влажность воздуха %	t матер. ср. = t мокрого термометра °С	Интенсивность испарения W г/м ² ·час
Начальный период . . .	20	56—66	70—50	52	37
Конечный период . . .	12	73—79	40—30	55	5

По графику устойчивой влажности (см. фиг. 5) влажному состоянию материала в первый период сушки соответствует равновесное состояние воздуха влажностью 91%.

Парциальное давление водяных паров, соответствующее данному влагосодержанию воздуха, будет равно 98 мм рт. ст.

Исходя из малой скорости движения воздуха в сушиле у материала, зададимся коэффициентом C в формуле Дальтона, равным 20 г/м²·час. По этой формуле, зная H и C , определим h — парциальное давление водяных паров воздуха. В нашем примере $h = 96$ мм рт. ст. Искомые параметры воздуха будут лежать в $I-d$ -диаграмме на линии одинаковых пределов охлаждения ($\vartheta = \text{const}$), проходящей через точку, соответствующую $H = 98$ мм рт. ст. и $\varphi = 91\%$. Искомая точка этой линии будет лежать на

пересечении линий $\vartheta = \text{const}$ с линией, соответствующей $h = 96$ мм рт. ст.

Параметры искомого режима, соответствующие этой точке, будут:

$$t_{\text{вод}} = 59^\circ \text{ и } \varphi = 68\%$$

т. е. те средние значения t и φ , которые действительно были осуществлены в опытной сушке.

В первый период сушки, когда влажность древесины была близка к точке насыщения волокна, мы могли, во-первых, задаться величиной коэффициента C по Дальтону, проводя таким образом аналогию между испарением с поверхности дерева и испарением с поверхности воды, и во-вторых, принять температуру материала, равной температуре шарика мокрого термометра. Во второй период сушки мы этого без существенных погрешностей сделать не можем—для второго периода мы должны знать действительную температуру материала.

РЕЖИМ СУШКИ

В США разработаны для местных пород режимы сушки дерева, которые даются в виде таблиц или графиков, указывающих температуру и влажность воздуха в сушиле в течение всего процесса сушки. Для наших пород таких всесторонне проверенных и рекомендуемых режимов нет еще до сих пор.

Таблица 2

Режимы сушки для лиственных пород

Абсолютная влажность дерева %	1		2		3		4		5		6		7		8	
	t°	φ	t°	φ	t°	φ	t°	φ	t°	φ	t°	φ	t°	φ	t°	φ
Выше 45	60	80	57	80	54	80	52	80	49	80	46	80	43	85	41	85
От 45 до 30	63	75	60	75	57	75	54	75	52	75	49	75	46	80	43	80
„ 30 „ 25	66	70	63	70	60	70	57	70	54	70	52	70	49	75	46	75
„ 25 „ 20	68	60	66	60	63	60	60	60	57	65	54	65	52	65	49	70
„ 20 „ 15	71	50	68	50	66	50	63	50	60	55	57	55	54	55	52	60
„ 15 „ 10	74	35	71	35	68	40	65	40	63	45	60	45	57	45	54	50
„ 10 „ и ниже	77	20	74	20	71	25	68	25	66	30	63	30	60	35	57	40

В табл. 2, 3, 4, 5, и 6 приведены режимы и сроки сушки различных пород дерева, собранные из различных, наиболее достоверных источников, которыми авторы пользовались для подсчета емкости сушильных установок при их проектировании.

Нижеприводимые соображения о режиме и продолжительности сушки взяты из книги R. Thelen „Kiln drying handbook“.

Режим сушки основывается исключительно на изменении влажности сушеного материала. Срок сушки заранее точно не задается и зависит от поведения материала в сушильной камере.

Таблица 3

Режим сушки хвойных пород

Абсолютная влажность дерева, %				t°	φ %
I	II	III	IV		
000					
> 45 40—20 < 20	> 40 40—35 35—16	> 35 35—30 30—13	> 30 30—25 25—13	82 88 93	70 50 30
00					
> 45 40—20 < 20	> 40 40—35 35—16	> 35 35—30 30—13	> 30 30—25 25—13	71 77 82	70 50 30
0					
> 35 35—30 30—20 20—15	> 30 30—25 25—16 16—12	> 25 25—20 20—13 13—10	— — — —	57 66 74 79	70 50 40 30

Процесс сушки делится на три стадии: 1) подготовка материала к сушке, 2) собственно сушка и 3) конечная обработка материала.

Таблица 4

Режим сушки авиососны

Абсолютная влажность дерева, %	t°	φ, %
Выше 25	50	80
От 25 до 20	52	70
„ 20 „ 15	55	60
„ 15 „ 12	60	45
„ 12 „ 8	62	40
„ 8 и ниже	65	35

Подготовка материала к сушке преследует две цели: прогрев материала и уничтожение напряжений, возникающих в материале при хранении в результате естественной сушки. Эти цели достигаются в зависимости от состояния материала пропариванием или обработкой воздухом высокой влажности.

Таблица 5

Таблица режимов сушки

№ п/п	Хвойные породы			№ п/п	Лиственные породы	
	Порода	Толщина материала мм	№ режима		Порода	№ режима
1	Кедр . . .	25—38	00-III	1	Акация	5
		45—56	00-IV	2	Береза	1
		25—38	00-I	3	Бук	3
2	Кипарис . . .	45—56	00-II	4	Вишня черная . . .	5
		65—75	0-I	5	Дуб	6—8
		25—38	00-II	6	Ива	2
3	Лиственница	45—56	00-III	7	Ильм	2
		65—75	0-II	8	Каштан	2
		25—38	000-I	9	Клен	3
4	Пихта	45—56	000-II	10	Липа	1
		65—75	0-I	11	Магагони	4
		25—38	00-II	12	Магнолия	4
5	Сосна	45—56	00-III	13	Орех грецкий	5
		65—75	0-II	14	Тополь виргин- ский	2
		25—38	000-II	15	Тополь желтый	1
6	Ель	45—56	000-III	16	Ясень	2
		65—75	000-IV	17		
			0-I			

Примечание. Все режимы для досок толщиной до 38 мм.

Если на поверхности материала имеются напряжения растяжения (что можно узнать по поверхностным трещинам или с помощью выпиленной из образца пластинки, так называемой „силовой секции“), применяют обработку паром — пропарку. Обычно эта обработка продолжается 1½—2 часа на каждые 25 мм толщины материала при температуре на 5—8° выше температуры начала сушки. В случае сушки сырого материала пропаривание не следует вести так долго. Здесь пропаривание нужно только для прогрева материала. На каждые 25 мм толщины материала вполне достаточно 1 часа.

Относительную влажность воздуха в сушиле во время пропарки и во время снижения температуры до начальной температуры сушки следует держать 100%.

Одновременно с уничтожением поверхностных натяжений в материале во время пропарки происходит прогрев материала.

Если же поверхностный слой материала перед сушкой имеет напряжение сжатия, как говорят, материал имеет „закалку“, то пропарку заменяют обработкой воздухом высокой влажности. При этом чем глубже зона сжатия, тем медленнее и мягче ведут эту обработку, имея в виду предотвратить появление „обратной закалки“.

Таблица 6

Сроки сушки

№ п/п	Порода	Длительность в сутках при влажности дерева	
		от свежесрубленного состояния до 60%	от 25 до 60%
1	Дуб	20—50	12—25
2	Орех грецкий	22—30	13—15
3	Бук	16—22	9—12
4	Береза, ясень	15—21	9—12
5	Тополь, липа, орех, вяз, вишня	8—10	4—6
6	Клен	17—23	9—13
7	Лиственница	9—12	4—6
8	Кипарис, красное дерево	10—18	6—8
9	Ель, сосна, пихта, кедр	2—6	2—4

Примечания.

1. Сроки отнесены к толщине 25,4 мм (1").
2. Для более толстого материала длительность сушки увеличивается:
 - а) при толщине от 1 до 3" пропорционально толщине,
 - б) при толщине более 3" несколько быстрее.
3. Для более тонкого материала длительность сушки сокращается приблизительно пропорционально квадрату толщин.
4. Таблица составлена для материала с конечной влажностью 60%; при сушке до 14% длительность сокращается на 25—30%.

Если глубина слоя, в котором имеются напряжения сжатия, невелика, то можно допустить пропаривание при 100% относительной влажности воздуха. В случае более глубокой „закалки“ влажность воздуха в сушиле вместо 100% удерживается на 60—85% в зависимости от сухости материала. Времени для обработки требуется гораздо больше (от 10 до 30 час.), зато действие ее распространяется вглубь материала гораздо равномернее.

Обработка высокой влажностью применяется всегда, когда влагосодержание сердцевины материала менее 18%. При большем влагосодержании можно без опасений воспользоваться пропаркой.

Обработка воздухом высокой влажности, так же как и пропарка, ведется при температуре на 5—8° выше начала сушки. При обработке воздухом высокой влажности относительная влажность его изменяется в зависимости от сухости материала.

Она может равняться 75—90% при влагосодержании сердцевины 15—18% и 65—75% — при меньшем влагосодержании.

Собственно сушка. Предполагается, что к началу сушки материал прогрет, и все предварительные напряжения ослаблены. Если в процессе сушки обнаружится по состоянию материала, что эти напряжения полностью не уничтожены, то необходимо далее сушку вести особо осторожно, применяя периодическую обработку воздухом высокой влажности.

Необходимо заметить, что лучшие результаты и меньший риск порчи, в особенности от свищей, достигаются частыми и непродолжительными мягкими обработками, а не редкими продолжительными и резкими.

Во всех режимах влажность поступающего в сушило материала является отправным пунктом, с которого начинается режим сушки. Начинать сушку по режиму надо только с той ступени, которая соответствует начальной влажности материала, — все предыдущие ступени откидываются (см. табл. 1—4). Температура и влажность воздуха относятся к воздуху со стороны входа в штабель.

3. *Конечная обработка материала* состоит в уничтожении „закалки“, охлаждении материала и выдержке его перед обработкой. Неглубокая „закалка“ сама по себе не является опасным дефектом при сушке, хотя она, конечно, нежелательна. Однако с высушенным материалом дело обстоит иначе, и „закалка“ в нем является серьезным дефектом, который при обработке ведет к короблению, изгибу и пр. Поэтому „закалку“ необходимо уничтожить до выдачи материала из камеры, и для этого в режиме сушки необходимо предусматривать конечную обработку.

Обычно конечная обработка применяется к твердым породам, но в случае если материал идет на распиловку, обработка применяется также и для сосны.

Поскольку это возможно, материал должен быть постепенно охлажден до выгрузки его из сушила, так как действие холодного воздуха на нагретый материал может повести к образованию трещин вследствие усадки при резком охлаждении, а также вследствие быстрой сушки, вызванной увеличением разности парциальных давлений на поверхности материала и в атмосфере холодного воздуха.

В конце сушки влагосодержание отдельных досок в камере неодинаково; влажность слоев одной и той же доски по толщине также будет различной, хотя и незначительно. Поэтому необходимо выдерживать доски перед обработкой для того, чтобы выравнять влажность в материале. Необходимое для такой выдержки время изменяется в зависимости от условий.

Хранение в течение недели считается достаточным для мебельных материалов. Для авиалеса необходима выдержка в течение двух недель.

Материал, который должен сохранять свои точные размеры,

необходимо сохранять в соответствующих условиях влажности воздуха, так как иначе он либо поглощает, либо отдает влагу, что служит причиной деформации материала.

Материал, поступающий из влажных холодных помещений в нагретые мастерские, слишком влажен и без досушки негоден для изделий. Короткие куски материала с большими торцевыми поверхностями при хранении в сыром месте стремятся к закручиванию.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СУШКИ

Точные указания относительно продолжительности сушки не могут быть надежными, так как продолжительность сушки весьма широко колеблется в зависимости от индивидуальных свойств различных сортов дерева, а также от продолжительности пропарок и окончательной обработки. Наименьший срок, который удалось наблюдать в Американской лаборатории лесных материалов, был для пихтовых брусков 1" × 4" 24 часа. Обычная продолжительность сушки дерева мягких пород, например для пихты и сосны, колеблется от 2 до 4 дней на 1" толщины, хотя отклонения от этого срока бывают в обе стороны. Наиболее медленной является сушка вагонных брусьев из некоторых американских сортов южного дуба. Эти брусья находились в камере почти год и даже после этого срока имели влажность не менее 15%. Тяжелые дубовые брусья требуют около 1½—2 месяцев на 1" толщины для сушки до 15% влажности.

Средние продолжительности сушки обычных пород дерева приведены в табл. 6 (стр. 32).

Приведенные в таблице сроки сушки взяты из данных Thelep (1923 г.). Тот же автор в 1929 г. приводит сокращенные сроки сушки:

	1923 г.	1929 г. ¹
Береза	21 суток	14—19 суток
Клен	22 "	15—22 "
Орех	30 "	20—24 "
Дуб	40—56 "	20—37 "

СИСТЕМЫ СУШИЛ

ЕСТЕСТВЕННОЕ ОРГАНИЗОВАННОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОЗДУХА²

Изучением естественного движения нагретых газов занимался проф. В. Е. Грум-Гржимайло, создавший гидравлическую теорию движения газов. В своем введении к книге „Пламенные печи“ он пишет: „В основу гидравлической теории конструкций и расчета пламенных печей (и сушил, А. П.) положена аксиома: движение пламени должно рассматриваться, как движение лег-

¹ Заимствовано из книги инж. М. Ю. Лурье.

² В основу этого раздела положен доклад автора на I Всесоюзной конференции по сушке дерева, происходившей в декабре 1929 г.

кой жидкости в тяжелой". Легкая жидкость — нагретый воздух или газ, тяжелая — воздух или газ окружающей атмосферы.

Приняв эту, очень простую аксиому гидравлической теории, легко понять сущность работы гидравлически правильно построенного сушила с естественным организованным движением воздуха.

Проф. В. Е. Грум-Гржимайло разработал схему сушил многократного насыщения с естественной циркуляцией (фиг. 3)¹.

Сущность работы этого сушила описана в статье „Основы гидравлически правильной конструкции сушил“ (стр. 7).

В основу системы положены три принципа.

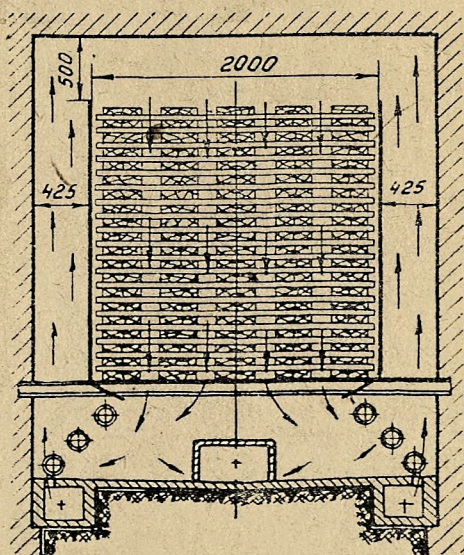
Первый принцип — осуществление многократной циркуляции за счет напора, создаваемого разностью весов нисходящего охлажденного потока воздуха у материала, подвергаемого сушке, и восходящего потока нагретого воздуха — над приборами отопления.

Циркулирующий поток воздуха, кратность циркуляции, перепад температур и скорость воздуха по ходу, вызванные процессом сушки, — все эти величины, которые влияют на равномерность сушки, в данной системе сушила с организованной естественной циркуляцией могут быть подсчитаны так же, как и в сушилах с принудительной циркуляцией.

Формулы для расчета составлены инж. Г. П. Иванцовым и приведены в примерах расчета сушил.

Второй принцип. При омывании материала в рабочем пространстве сушила воздух насыщается влагой и охлаждается. Первое облегчает воздух, второе утяжеляет его. В итоге получается утяжеление, так как влияние охлаждения примерно в десять раз больше влияния насыщения.

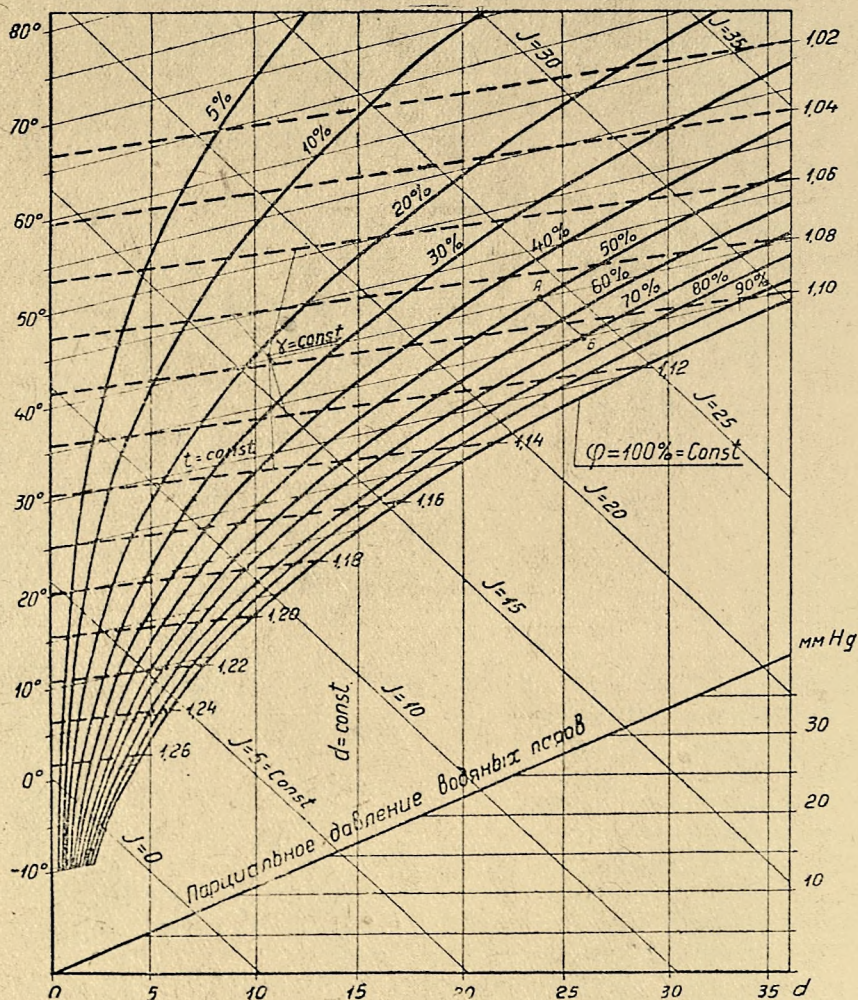
Для большей наглядности приводим $I-d$ -диаграмму с нанесенными на ней кривыми равных удельных весов влаж-



Фиг. 3. Схема сушила многократного насыщения с естественной циркуляцией.

¹ В книге проф. Гирш „Сушка и сушила“ (изд. 1932 г.) опубликована аналогичная схема сушила с естественной циркуляцией, запатентованная одним из самых крупных теплотехников-сушильщиков в Германии.

ного воздуха $\gamma = \text{const}$ (фиг. 4), из которой видно увеличение удельного веса воздуха при сушке. Отсюда, — сушимый материал должен омываться нисходящим потоком воздуха.



Фиг. 4. $I - d$ -диаграмма с нанесенными линиями равных удельных весов.

Пример: Состояние воздуха до сушки (A)

$$t_1 = 40^\circ; \varphi_1 = 50\%; \gamma_1 = 1,09 \text{ кг/м}^3$$

Состояние воздуха после сушки (B)

$$t_2 = 35^\circ; \varphi_2 = 70\%; \gamma_2 = 1,105 \text{ кг/м}^3$$

Приращение удельного веса воздуха в процессе сушки AB ($I = \text{const}$)

$$\gamma_2 - \gamma_1 = 1,105 - 1,09 = 0,015 \text{ кг/м}^3$$

При нисходящем потоке достигается саморегулирование процесса сушки материала, имеющего различную влажность, и выравнивание температур в горизонтальном сечении сушильной

камеры. Это саморегулирование происходит только при естественном нисходящем потоке воздуха.

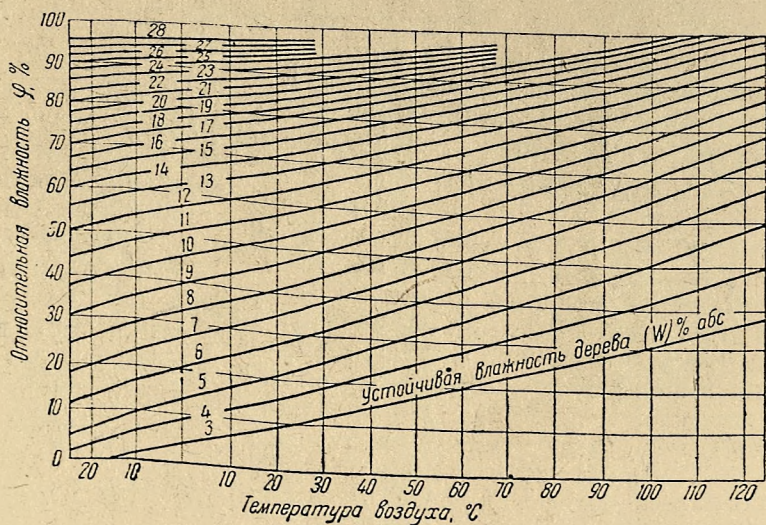
Третий принцип — экономичность — характеризуется отбором отработанного воздуха у пода сушильной камеры, т. е. там, где воздух наиболее влажен и охлажден.

Место отбора отработанного воздуха сильно влияет на экономичность работы сушила, особенно в сушилах для дерева, где сушка идет, по преимуществу, во влажных режимах, так как для достижения влажной атмосферы (во избежание поводки материала) приходится в камеру давать большое количество пара (например в сушилах системы „National“). Более экономично для насыщения воздуха пользоваться влагой, содержащейся в самой древесине. В таких случаях мы рекомендуем пар давать только в начале процесса сушки, для обработки материала, пропарка же в период сушки должна быть заменена регулировкой смены воздуха в сушиле. Потери камеры через пол в таком сушиле идут за счет отработанного воздуха. Паразитный холодный воздух, попадающий в камеру через неплотности стен, падает на пол и удаляется через отводящий канал, не нарушая режима работы камеры.

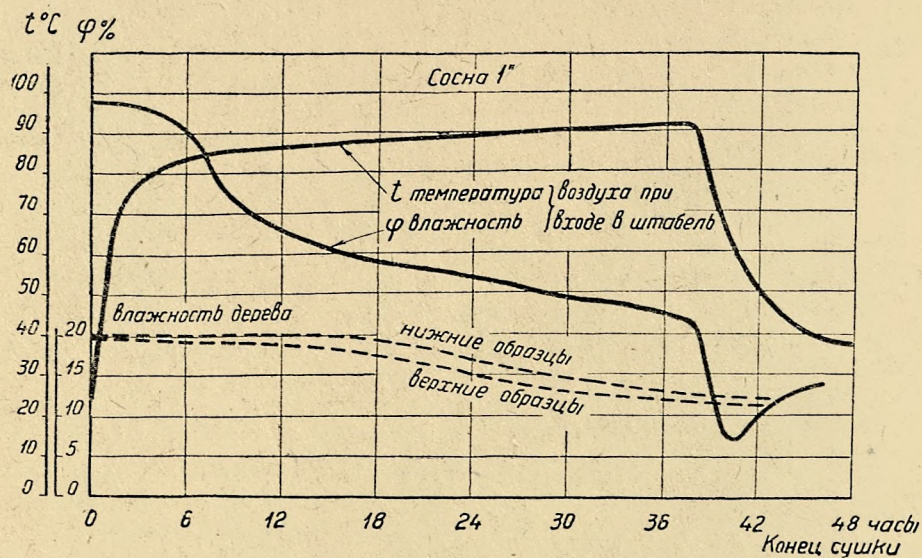
Все эти условия обеспечивают максимальную экономичность сушила при данном режиме сушки.

Для полной ясности разберем ряд возражений, часто встречающихся в процессе разработки и внедрения в жизнь данной системы сушила. Наиболее важное из них состоит в том, что в гидравлически правильно построенных сушилах имеет место отставание сушки низа штабеля вследствие более низкой температуры и большей влажности воздуха внизу сушила. Эта неравномерность сушки по ходу воздуха — явление, неизбежное для любого сушила, так как сам процесс сушки вызывает изменение состояния (влажности и температуры) воздуха, а следовательно, и неравномерность сушки. Однако не случайно вопрос о неравномерности сушки возник по отношению к сушилам с организованным движением воздуха. Закономерное движение воздуха в сушиле дает наглядную картину всех процессов сушки материала, а следовательно, и неравномерности ее. В сушилах, менее совершенных, эта неравномерность еще больше, но она ненаглядна; вследствие хаотического движения воздуха ее нельзя количественно учесть.

В гидравлически правильно построенном сушиле теплый воздух входит в штабель сверху, омывает штабель, постепенно насыщается влагой и стынет. Совершенно ясно, что сушка внизу штабеля пойдет медленнее, чем вверху. Здесь эта неравномерность легализуется как неизбежное следствие процесса сушки, точно так же, как понижение температуры газов в последних ходах парового котла уменьшает теплообмен в них. Самое главное, что в сушиле с естественным движением воздуха можно заранее рассчитать перепад температур и выбрать систему сушила или с естественным движением воздуха, или с принуди-



Фиг. 5. Кривые равновесия влажности древесины и воздуха.



Фиг. 6. Кривая сушки дюймовой сосны.

тельным движением, в зависимости от величины допустимого перепада. Как правило, в сушилах для дерева, естественный напор оказывается достаточным для обеспечения необходимой скорости циркуляции воздуха и, следовательно, допустимого перепада температур.

На фиг. 6 дан пример интенсивной сушки 25-миллиметровых сосновых досок. Здесь видно влияние перепада на сушку верхних и нижних досок. Влияние это очень мало — разница во влажности досок находится в пределе 2—3%.

Далее, в статье „Тепловой расчет камер“ (стр. 85) будут даны примеры гидравлического расчета сушила. Как видно из расчета, очень большое значение для равномерности сушки имеет укладка материала. Штабелевка материала должна соответствовать направлению движения воздуха в рабочем пространстве сушила. Толщина прокладок и ширина вертикальных прозоров между досками связаны с системой сушила; от этого в очень большой степени зависит равномерность сушки.

Обычно эти положения не учитываются, и работники заводов считают, что чем больше они загрузят в камеру материала, тем больше будет производительность сушила. Это совершенно неверно. Если при загрузке не учитывается циркуляция воздуха, то материал будет сохнуть дольше, неравномерно, с большим браком.

Пример такой неправильной штабелевки при вертикальном движении воздуха в камере дан на фиг. 7. После большой работы на заводе удалось добиться правильной штабелевки материала (фиг. 8).

В сушيله с нисходящим потоком воздуха доски рационально укладывать на ребро. Штабелевка на ребро дает значительно больший коэффициент заполнения камеры. Этот способ загрузки требует специальных самозатягивающихся вагонеток и штабелевочной машины.

Практика работы рассматриваемых сушил и при горизонтальной штабелевке досок дает вполне удовлетворительные результаты. В этом случае, хотя воздух и не омывает всей доски равномерно, все же благодаря малой интенсивности испарения влаги с поверхности материала и диффузии влаги в атмосфере воздуха сушка идет практически очень равномерно по всей ширине доски.

На перепад температуры в штабеле, как выявляет опыт, оказывает влияние также прямая отдача холодного пола при неправильной конструкции его. В этом случае нижний ряд досок сильно отстает при сушке.

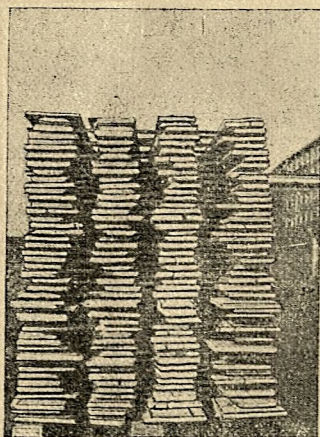
Следующим вопросом, вызывающим споры, является вопрос об экранах. Отсутствие экранов в сушилах некоторыми рассматривается как прямое отклонение от основной логической схемы В. Е. Грум-Гржимайло.

В. Е. Грум-Гржимайло так объясняет назначение экранов: „Для того чтобы упорядочить эту циркуляцию и дать

воздуху надлежащую скорость, мы устанавливаем экраны по бокам сушимых предметов“. Это было написано, когда только что строились первые сушила. Теперь практика показала, что и без экранов движение нагретого воздуха над нагревательными приборами вверх и у материала — вниз совершенно устойчиво. Таким образом в случае когда можно пренебречь действием на боковую поверхность материала более горячего воздуха, поднимающегося от калорифера и не успевающего перемешаться с увлекаемым ими окружающим воздухом, а также, если не защищать нижних углов штабеля от прямой отдачи горячих нагревательных труб, — экраны в сушиле оказываются лишними.



Фиг. 7. Неправильная штабелевка.



Фиг. 8. Правильная штабелевка.

В качестве примера, иллюстрирующего сказанное, укажем на случай сушила для леса, где обязательна установка экрана; при поперечной загрузке штабеля в камеру, когда торцы досок могут омываться горячим вертикальным потоком воздуха, будет иметь место наложение двух явлений: действие более горячих струй воздуха и легкая отдача влаги через торцы досок. В этом случае экран необходим, иначе торцы досок растрескаются более, чем это обычно бывает в условиях практики.

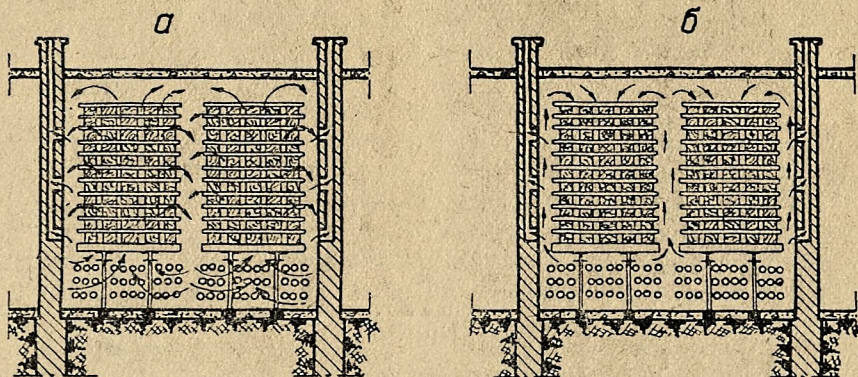
НЕКОТОРЫЕ СИСТЕМЫ СОВРЕМЕННЫХ СУШИЛ С ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

С целью проверки схемы движения воздуха в сушилах для выяснения действительной картины этого движения автором совместно с А. А. Чижовым было проведено наблюдение над движением воздуха с помощью дымаря и микроанемометра в камерном сушиле типа „National“ и конденсационном сушиле Andrews. Первое из них разработано б. Древестром как типовая конструкция под названием „Пекар“.

Камерное сушило типа „National“

Камера, над которой проводились наблюдения, отличалась от оригинала камеры фирмы „National“ только нагревательной поверхностью. Гладкие нагревательные трубы заменены 12 рядами ребристых круглых труб.

По мысли конструкторов этого сушила движение воздуха в нем должно установиться по схеме фиг. 9, а. Воздух, нагретый у труб, должен подняться по прозорам между досками, а в случае установки в камере двух штабелей, — и по среднему пространству между штабелями и далее веерообразными потоками омыwać доски в штабеле. Отработанный воздух должен частью уйти через отверстия в боковых стенах в атмосферу, частью же каким-то образом стечь вновь к нагревательной поверхности.



Фиг. 9. Камерное сушило типа „National“.

Как показали наблюдения, произведенные нами, в действительности картина движения воздуха в сушиле совсем иная (фиг. 9, б): воздух, нагретый у труб отопления, поднимается по боковым пространствам между штабелями и стенами и по среднему пространству между штабелями под потолок сушила. Воздух, идущий по боковым пространствам, интенсивность потоков в которых значительно больше, чем в среднем пространстве между штабелями, в значительной части уходит неполностью использованным в отводные отверстия, минуя штабель. В самих штабелях между досками наблюдается совершенно ясный нисходящий поток воздуха.

Искаженная схема движения воздуха нарушает три условия, определяющие качество сушила: 1) равномерность сушки, 2) экономичность сушила и 3) устойчивость режима и гибкость управления.

Рассмотрим каждый из этих факторов применительно к данной системе сушила.

Равномерность сушки. Струйки горячего воздуха с поверхности нагревательных приборов направляются вверх, будучи бо-

лее легкими, чем окружающая среда. Там, где над нагревательными приборами имеются свободные пространства, струя беспрепятственно движется кверху, достигая потолка камеры; струя воздуха, заполняющего штабель, насыщается влагой, охлаждается, становится тяжелее и приобретает тенденцию двигаться вниз. Ее место занимает струя сухого горячего воздуха из пространства над штабелем. В местах, где струя горячего воздуха, поднимающаяся от нагревательной поверхности, встречает штабель, она проникает в прозоры между досками. По мере движения ее вверх по поверхности материала она также увлажняется и становится более тяжелой.

Далее струя восходящего воздуха встречается с нисходящей струей, происходит удар струй и потеря живой силы. Борьба нисходящего и восходящего потоков решается в пользу нисходящего тока, так как восходящий поток охлаждающегося газа, по законам гидравлической теории, не может быть устойчивым. В начале процесса сушки мы будем иметь безусловно нисходящий поток.

При такой системе движения воздуха в штабеле, в середине его, где происходит столкновение потоков, образуется застойный мешок влажного воздуха, от времени до времени прорывающегося вниз. Движение воздуха в штабеле отличается неустойчивостью, и обычные в сушила явления (плотность укладки штабелей в камере, различная влажность материала, одновременно загруженного в камеру, и пр.) особенно сильно отзываются на качестве сушки. Наличие неорганизованной циркуляции воздуха (встречные потоки воздуха) вызывает увеличение перепада температур в камере и как следствие — неравномерность сушки: верх и низ штабеля сохнут более интенсивно, середина же отстает.

Все описанные факты в точности подтвердились наблюдениями.

Экономичность сушила. Отбор отработанного воздуха в сушиле любой системы должен производиться в месте наибольшего насыщения его парами воды. От этого в первую очередь зависит экономичность работы сушила. Этим всецело и объясняется устройство отводных отверстий в сушилах „National“ с боков штабеля. Так как место наибольшего насыщения воздуха внутри штабеля, при неустойчивой циркуляции, перемещается по высоте, то и отбор воздуха в сушиле должен происходить на различной высоте, для чего сделаны три ряда отверстий по высоте камеры.

Такое расположение отверстий могло бы дать эффект только в том случае, если бы штабель непосредственно касался стены, что возможно лишь при ручной загрузке. Наличие же небольшого прозора (порядка 100 мм) между стеной и штабелем уже достаточно для того, чтобы в этом прозоре установился восходящий поток горячего воздуха, поднимающегося от нагревательных труб.

В рассматриваемом случае прозор между стеной и штабелем равен 400—500 мм, и естественно, что горячий воздух будет по этим прозорам подниматься вверх и часть его будет удаляться в отводные отверстия, на какой бы высоте они ни были расположены. Вместе с этим воздухом в атмосферу выбрасывается и часть того пара, который только что был дан в камеру для увлажнения. Таким образом в сушиле „National“ в отводную трубу уходит неиспользованный, наименее влажный воздух и пар, данный в камеру для увлажнения, вследствие чего расход тепла на сушку увеличивается.

Устойчивость режима и гибкость управления. Поскольку сушка дерева требует строгого соблюдения режимов, и незначительные отклонения от них могут вызвать брак всей партии, постольку конструкция сушила для дерева должна обеспечить устойчивость режима, и сушило должно быть легко управляемым. Устойчивость режима зависит от совершенства системы циркуляции и системы смены воздуха — отводных труб.

Недостатки системы циркуляции были указаны выше. Несколько отводящих труб из одной камеры, согласно законам гидравлической теории, не могут работать устойчиво (см. В. Е. Грум-Гржимайло „Пламенные печи“, ч. II). Произвольные влияния (ветер, открытие дверей в камеру и пр.) могут вызвать перераспределение расхода воздуха через трубы или даже в некоторых нарушить работу, что вполне вероятно при малой скорости воздуха в трубах.

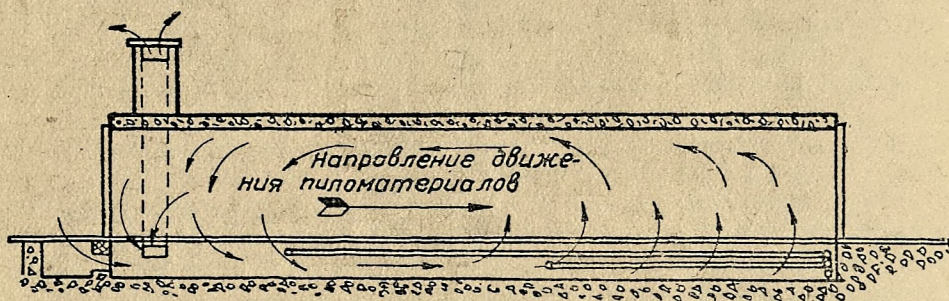
Режим сушки материала определяется сменой воздуха и подачей тепла. В системе „National“ первый фактор выпадает из сферы управления, так как добиться отбора воздуха равномерно, через все трубы, невозможно. Это вызывает неустойчивость режима и неравномерность сушки в отдельных местах камеры.

В США ведут борьбу с колебаниями режима сушки помощью автоматов, устанавливаемых на системах отопления и увлажнения, тогда как по существу дела в сушиле, которое правильно спроектировано, режим не должен произвольно меняться, и управление сушилом должно сводиться лишь к периодическому изменению режима сушки.

Непрерывно действующее сушило „National“

По аналогии с камерным сушилом можно сказать, что схема движения воздуха в этом сушиле, взятая из каталога фирмы, верна лишь условно: в холодном конце камеры воздух пойдет нисходящим потоком по всему сечению камеры, со стороны же выгрузки, в горячем конце, воздух вверх будет подниматься только в пространстве между штабелями и стеной. В штабеле будет иметь место нисходящий поток, заторможенный восходящими струями горячего воздуха от нагревательных приборов. Это отрицательно скажется на качестве продукции и экономичности работы сушила.

Все изложенное можно отнести и к сушилам Мооре с естественным движением воздуха.



Фиг. 10. Непрерывно действующее сушило типа „National“.

Конденсационное сушило системы Andrews

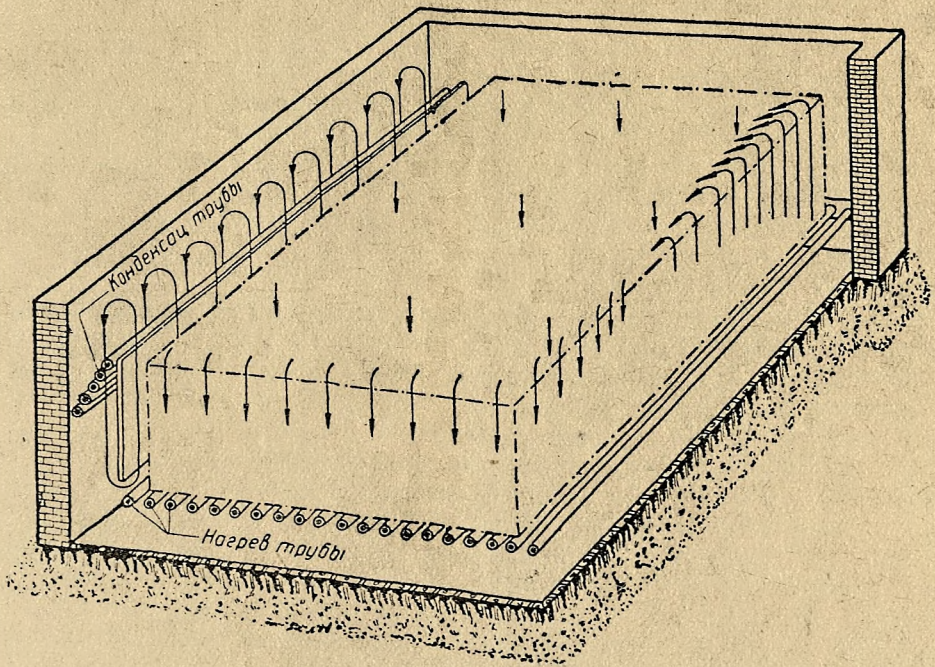
Сушило этой системы должно работать по следующей схеме. В сушиле циркулирует постоянный объем воздуха. По задуманной схеме нагретый у труб воздух поднимается по штабелю, увлажняется, собирается вверху сушила, откуда заворачивает в бок и проходит у конденсационных труб; часть влаги из воздуха конденсируется, воздух охлаждается, падает к полу сушила, опять нагревается, снова пронизывает штабель и т. д. до тех пор, пока не закончится сушка.

Поверхность нагрева сушила состоит из гладких газовых 25-миллиметровых трубок, сплошь уложенных в пространстве под штабелем. Экран, отделяющий конденсатор из гладких труб, по которым циркулирует холодная вода от штабеля, сделан теплонепроницаемым. Конденсирующаяся на трубах влага стекает в желоб, расположенный под конденсационными трубами (на фигуре не показаны). Вместо дверей сушила снабжены двойными брезентовыми шторами.

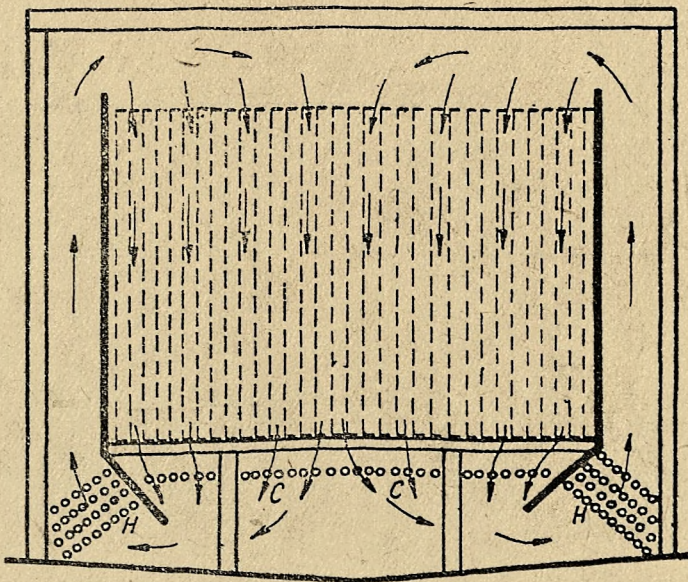
Действительная картина движения воздуха в сушиле, наблюдавшаяся с помощью паров хлористого аммония, такова (фиг. 11). Воздух по бокам штабелям по небольшим проходам шириной 300—400 мм между штабелями, стенами и экраном поднимается вверх и затем идет тремя потоками.

1. Воздух движется по направлению к шторе-двери в передней части камеры. Это движение обусловливается охлаждением воздуха у шторы. Температура в правом боковом проходе во время наблюдения была 74°, а в проходе между штабелем и шторой 68°. Разница в 6° создает необходимый гидростатический напор для движения воздуха.

2. Меньшая часть воздуха, пропорциональная сопротивлению штабеля, стекает в штабель по вертикальным проходам, преодолевая подпор горячего воздуха от нагревательных труб.



Фиг. 11. Схема конденсационного сушила.



Фиг. 12. Схема конденсационного сушила с правильно расположенными конденсаторами.

3. Поток воздуха, поднимающегося в левом вертикальном проходе между экраном и штабелем, сразу же огибает экран и, омывая конденсатор, спускается вниз. Разница температур в рабочем пространстве и за экраном (8—10°) создает это движение.

Ошибка конструктора данного сушила состоит в том, что он расположил штабель в восходящем потоке воздуха, который при наличии процесса сушки-охлаждения не может быть устойчивым и всякий раз будет нарушаться от произвольных причин.

Становятся также понятными трудности управления и регулирования процесса сушки в гидравлически неправильно построенных сушилах.

Гораздо более логична схема конденсационного сушила, изображенного на фиг. 12. Здесь *H, H*—трубы отопления, *C, C*—конденсационные трубы. Материал сохнет в *нисходящем потоке*, и поэтому равномерно.

Второе основное отличие этой схемы состоит в том, что вследствие расположения конденсатора на уровне (или ниже) труб отопления не создается дополнительного напора охлажденного у конденсатора воздуха, и из-за отсутствия этого напора не возникает принудительный поток, как в первой схеме. Материал сохнет в естественном потоке, конденсатор заменяет лишь систему смены воздуха, но не циркуляционную систему.

В табл. 7 приведены результаты испытаний рассмотренных выше систем сушил, произведенных Институтом древесины. Эти результаты совершенно наглядно подтверждают все дефекты сушил, которые были указаны выше.

Таблица 7

Системы сушил	Расход пара на 1 м ³ древесины кг/час	Расход воздуха на 1 кг испаряемой влаги кг	Колебания конечной влажности в отдельных досках %	Устойчивость режима
Система Грум-Гржимайло; периодического действия	2,99	18,6	2,00	Устойчивый
„National“; периодического действия	5,16	76,64	3,21	Неустойчивый
„National“; непрерывного действия	3,53	23,05	3,87	„
Мооре; непрерывного действия	3,16	43,1	2,54	„
Конденсационное сушило периодического действия	2,99	—	2,90	Устойчивый

Примечание. Расход тепла дается обычно на 1 кг испаренной из материала влаги. Данное измерение выбрано Институтом древесины неудачно.

Переход американской практики сушки дерева к сушилам с принудительным движением воздуха мы объясняем неумением использовать силы природы и неприменением гидравлической теории движения газов.

Совершенно очевидно, однако, что и при принудительном движении воздуха результаты работы сушильных камер будут неудовлетворительны, если не будет принято во внимание изменение удельного веса воздуха при сушке, так как скорость воздуха, омывающего материал, в самом рабочем пространстве останется в пределах до 2 м/сек, т. е. в тех пределах, когда имеет место расслоение различно нагретого воздуха.

Громадное количество различных систем сушил и с естественным и с принудительным движением, построенных у нас и за границей, мы объясняем отсутствием у конструкторов ясного представления о работе воздуха в сушилах.

КОНСТРУКЦИЯ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР

Иностранная промышленность, применяющая сушку дерева, в том числе и американская, в этой отрасли наиболее развитая, не имеет совершенной системы сушила для дерева с естественной циркуляцией воздуха.

Как видно из предыдущего, даже наиболее распространенные сушила фирм „National“ и „Moore“ работают плохо и неэкономично. Плохое качество работы этих сушил зависит от неправильной схемы сушила, т. е. неправильного взаимного расположения в камере приборов отопления, вентиляции и материала, подвергаемого сушке.

Наша советская техника, вооруженная гидравлической теорией движения газов, имеет более совершенную схему сушила, с организованным естественным движением воздуха. Другое имеем в отношении конструктивного оформления сушил. Мы должны еще многое позаимствовать из американской практики, работающей с прекрасными специальными материалами, с рациональными конструкциями деталей камер, например специальный материал — пустотелые черепичные камни для стен и перекрытий, наклонные двери, которые изготовляет специальная фирма и т. д.

Ниже приведены основные соображения, которыми следует руководствоваться при проектировании и постройке сушильных камер. В основу взята американская практика, изложенная в книге R. Thelen „Kiln-drying Handbook“, и наша строительная практика сушил для дерева.

Ограждения сушильных камер

Сушило, помимо атмосферных условий, должно противостоять действию высокой температуры и влажности изнутри сушила, расширению и сжатию, связанному с изменением температуры,

и разрушающему действию кислот, выделяющихся при сушке дерева.

Отсюда, главные требования к материалу для постройки сушила: 1) теплонепроницаемость, 2) влагонепроницаемость, 3) кислотоупорность и 4) устойчивость против действия тепла и влаги, т. е. сушила представляют собой строения, работающие в гораздо более тяжелых условиях, чем обычные здания.

В качестве главных строительных материалов обычно употребляют пустотелые черепичные камни, кирпич, бетон и, редко, дерево. При правильно разработанной конструкции эти материалы дают удовлетворительные результаты.

Дерево употребляется для стен и перекрытий во временных постройках, особенно на лесопильных заводах. На постройку идут хвойные породы. Материал должен быть обязательно сухой, влажностью 8—10%. Сырая древесина недопустима ни при каких условиях.

Бетон употребляется главным образом для фундаментов. Большая пористость затрудняет применение его для стен и перекрытий. Следует предпочесть литой бетон, так как он значительно менее водонепроницаем, чем трамбованный. Трещины, образующиеся в бетонных конструкциях, трудно заделать.

Кирпич, обожженный на клинкер, является хорошим материалом для стен сушила. Обыкновенный кирпич, особенно плохо обожженный, чрезвычайно порист, более чем бетон. Количество влаги, поглощаемое 1 м³ кирпича, равно 300 кг, тогда как для гравистого бетона оно равно 59 кг. Это свойство кирпича заставляет для кладки сушил выбирать хорошо обожженный кирпич и стены сушила изнутри облицовывать водонепроницаемым материалом.

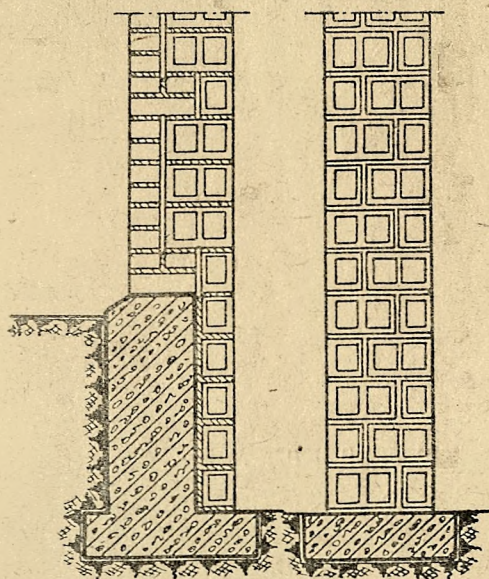
Наиболее совершенным материалом для стен и перекрытия сушильных камер является пустотелый клинкерный камень-черепица — материал, очень распространенный в американской практике. У нас в СССР он только вводится; у нас нет еще керамических заводов, специализировавшихся на его изготовлении. Система кладки стен показана на фиг. 13.

Кладка из пустотелой черепицы, обладая чрезвычайно малой влагонепроводностью и хорошей кислотоупорностью, как и кладка из клинкерного кирпича, обладает малой теплопроводностью благодаря пустотам. Лучше если пустотелая черепица имеет несколько малых пустот, чем одну большую. Отсутствие циркуляции воздуха в пустотах в этом случае уменьшает теплопроводность стены. Из тех же соображений пустоты нужно располагать так, чтобы не образовывались в стене сплошные вертикальные каналы. При этом надо иметь в виду прочность стены, которая при наличии пустот сильно уменьшается.

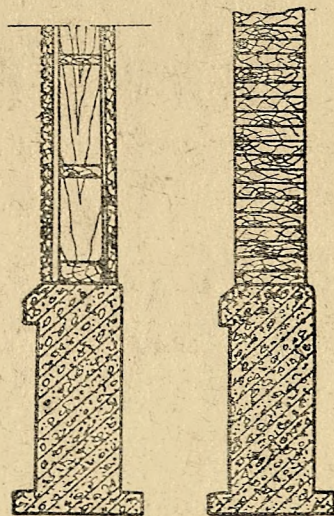
Швы кладки должны быть полными, снаружи расшиты заподлицо со стеной. Выступающая расшивка является источником отсыревания стен. Раствор для кладки берется 1:4. Песок должен быть некрупный и хорошо просеянный.

Кирпичные стены из сплошного кирпича не рекомендуется делать пустотелыми ввиду сложности кладки и невозможности получить ее хорошего качества. Пустоты в кладке, соединенные между собой и атмосферным воздухом, служат вследствие циркуляции воздуха в них хорошими проводниками тепла. Заполнение пустот каким-либо изоляционным материалом (шлаком, инфузорной землей) также не достигает цели. Конструкция получается многодельной, дорогой и ненадежной.

Как уже указывалось, деревянные стены у сушил строятся во временных установках. По данным американской практики удовлетворительными оказались только конструкции стен из де-



Фиг. 13. Кладка стен из пустотелой черепицы.



Фиг. 14. Конструкция деревянных стен.

рева, изображенные на фиг. 14. Непременным условием надежной работы таких стен является тщательная просушка дерева и отсутствие в нем трещин и коробления.

Для предотвращения деформации стен от периодического нагревания и охлаждения в конструкции должны быть предусмотрены температурные швы.

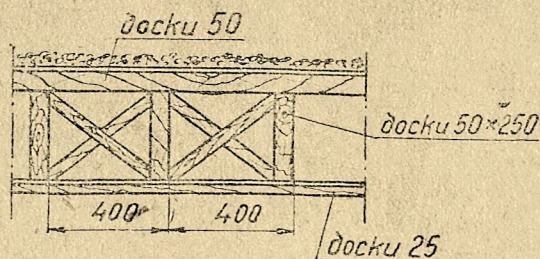
Основания и фундаменты под стены следует рассчитывать с большим запасом, так как неравномерная осадка и трещины в ограждениях гораздо более опасны для сушил, чем для обычных зданий. Неравномерная осадка расстраивает рельсовые пути и систему отопления; трещины ведут к потерям тепла и затрудняют поддержание заданной влажности воздуха в камерах. Ширина основания фундамента, как и во всех постройках, определяется характером почвы. Толщина фундамента и глубина его

заложения определяются конструкцией стен сушила и климатическими особенностями места постройки.

Фундамент выводится до уровня рельс. Если дренаж почвы недостаточен, фундамент защищают водонепроницаемым слоем, наносимым на внутреннюю поверхность стены фундамента. В стенах сушила необходимо укладывать водонепроницаемый слой из толя или асфальта.

Пол сушила должен быть теплым и не пропускать влаги из почвы. Обычно делают бетонный пол толщиной 100 мм. Слой бетона укладывается на теплую подготовку, состоящую из шлака, тощего шлакобетона или древесного угля. Для стока влаги в полу делают небольшой уклон в 0,005.

Перекрытие сушильных камер должно быть теплым и водонепроницаемым. В американской практике употребляются почти исключительно плоские перекрытия без чердачного помещения из пустотелой черепицы, покрытой сверху для защиты от про-



Фиг. 15. Конструкция деревянного перекрытия.

никновения атмосферных осадков специальными кровельными материалами. У нас вследствие отсутствия специальных кровельных материалов перекрытия пока строятся из железобетона, защищаемого изнутри камеры специальным водоупорным слоем, утепленным сверху шлаком, трепелом, опилками и пр.

Над перекрытием устраивается чердачное помещение и кровля на деревянных фермах. Опыт показал, что вследствие воздухопроницаемости перекрытия горячий влажный воздух из камеры неизбежно проникает в чердачное помещение, где влага конденсируется из воздуха, и создаются благоприятные условия для гниения деревянных частей сооружения. Рекомендуется поэтому поверх железобетонной плиты перекрытия класть слой пека толщиной 5—10 мм и поверх него два-три слоя толя. Утепление следует производить негниющими материалами; деревянные фермы и обрешетку прокрашивают защищающими от гниения составами и красками.

Перекрытие над камерами должно быть равномерной толщины и иметь температурные швы, чтобы в нем не образовались трещины от неравномерного нагревания и охлаждения. Поэтому в случае перекрытия багарей камер следует делать не общую

плиту, а отдельные плиты над каждой камерой. Балки перекрытия не должны представлять целого с плитой для того, чтобы деформации плиты и балки не зависели друг от друга и не вызывали трещин в местах связи балки и плиты, как это часто имеет место в обычных ребристых железобетонных перекрытиях.

В толевой кровле по деревянной обрешетке уклон делается 1/10. Плоские перекрытия имеют уклон от 1/50 до 1/25. В проходных сушилах уклон делается в сторону разгрузки, в том же направлении делается и уклон рельсового пути.

Американская конструкция деревянного плоского перекрытия показана на фиг. 15. Сверху перекрытие покрывается тремя-четырьмя слоями толя или композиционным составом. Подобные перекрытия применяются для пролетов 5—6 м. Применяется конструкция и из сплошного настила досок размером $50 \times 150 \div 200$ мм, уложенных на ребро и сбитых гвоздями. Материал может быть низкосортным, но обязательно высушенным до 8—10% влаги. Сверху перекрытие покрывается так же, как и предыдущая конструкция.

Системы отопления и вентиляции

В США в сушилах в качестве приборов отопления устанавливают почти исключительно гладкие железные трубы. Никаких преимуществ для отопления сушил гладкие трубы по сравнению с чугунными ребристыми трубами не имеют. Поверхность гладких труб меньше засоряется, но сами трубы и монтаж всей системы отопления обходятся дороже, примерно в $1\frac{1}{2}$ раза, чем чугунные. Распространение гладких труб в США в качестве приборов отопления объясняется сильно развитым манушмановским способом их изготовления.

У нас железные трубы — пока остро дефицитный материал. Как отопительные приборы гладкие трубы разрешено устанавливать в специальных производствах и в пищевой промышленности, где особенно важно отсутствие пыли, которая обычно скапливается на приборах отопления, в особенности на ребристых трубах. У нас наиболее распространены трубы длиной 1; 1,5 и 2 м, с круглыми ребрами, поверхностью нагрева 2 м^2 на 1 пог. м.

Поверхность нагрева таких труб в сушиле рассчитывается по обычной формуле $q = K \cdot \Delta t$, где K — коэффициент теплопередачи 1 м^2 трубы и Δt — разность температур пара и воздуха.

Давление пара в системе следует брать около 3—4 ат.

Расчет паропроводов следует вести по номограмме Штейнмана (см. Р. Г. Грановский „Котельные установки“). Скорость пара в разводящих трубах принимают 15—30 м/сек.

Уклон ребристых труб приблизительно 0,01, паропроводов 0,001.

Диаметр конденсационного трубопровода выбирают на один размер меньше паровой линии. Уклон конденсационных линий 1/500.

У ввода в сушило на паровой магистрали устанавливаются 1) водоотделитель, если можно ожидать конденсации пара в подводящих магистралях, 2) редукционный клапан с манометром и 3) паровой вентиль.

Систему, разводящую пар по камерам, лучше монтировать в виде кольца, на котором устанавливается нужное количество вентиля для возможности ремонта без остановки лишних сушильных камер.

В конце сети полезно поставить второй контрольный манометр. Паропровод в низшей его точке следует соединить непосредственно с конденсационной линией, для того чтобы можно было продуть систему перед пуском, и на соединительном участке поставить два проверенных вентиля.

На конденсационной линии, лучше ближе к приборам отопления, устанавливается конденсационный горшок. Его производительность должна быть выбрана из расчета трехкратного нормального расхода пара, для того чтобы он мог нормально работать в период пуска и прогрева системы отопления, когда расход пара наибольший.

За горшком устанавливается бак для конденсата, емкостью на 2—3 часа минимально. Из этого бака конденсат перекачивается обратно в котельную. Насос, обычно центробежный, устанавливается на уровне дна бака так, чтобы турбинка была всегда залита конденсатом.

Особое внимание следует уделять монтажу системы отопления. Основная масса простоев сушильных камер у нас объясняется плохой сборкой труб. Полная резьба на трубе, нужной длины болт у фланца, хорошо вырезанная клингеритовая прокладка — необходимые условия хорошей работы сушила. Конструкция опор, наличие мертвых точек, расположение их, расположение компенсаторов, их количество и уклон труб — все это должно быть тщательно продумано и выполнено.

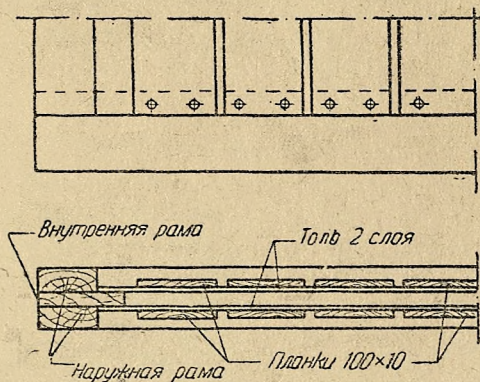
Вентиляционные каналы и трубы должны быть теплыми и защищены влагонепроницаемой штукатуркой, чтобы в случае выпадения конденсата на поверхность их стенок влага не впитывалась кладкой. Каналы в полу, и особенно вертикальные, и в стенах для удаления отработанного воздуха при кладке должны быть покрыты тщательно выполненной штукатуркой с железнением раствором цемента с песком (состав 1:2) без примеси извести.

Двери сушил

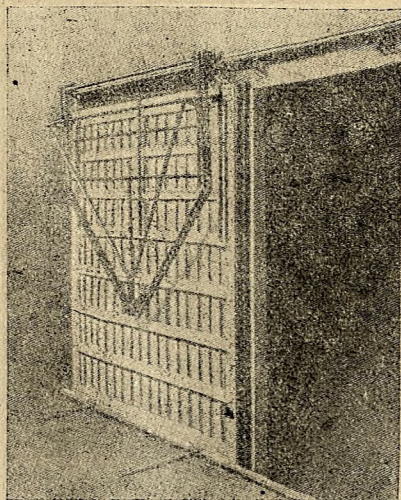
Двери сушила являются наиболее ответственной частью ограждения сушильной камеры, так как обычно через них происходит наибольшая потеря тепла. Практика работы сушил наших заводов показала, что подавляющее большинство дверей работает неудовлетворительно, причем плохая их работа объясняется не столько неудачной конструкцией, сколько небрежным выпол-

нением дверей из сырого, негодного леса. Подтверждением тому служат примеры работы импортных американских дверей той же конструкции, которые работают без отказа¹. Необходимо поэтому при изготовлении дверей в дальнейшем обращать особое внимание на качество изготовления их.

Почти стандартной конструкцией является наклонная подвесная дверь, откатывающаяся в сторону от дверного проема с помощью специального механизма-кошки, перекатывающейся по монорельсу, укрепляемому над дверьми по фронту сушильных камер. Принцип работы ее состоит в том, что полотнище двери особыми штырями вверху и в боковых торцах двери лежит на



Фиг. 16. Конструкция полотнища двери.



Фиг. 17. Общий вид дв

наклонных плоскостях-крючьях, закрепляемых на дверной колоде. Дверь, скользя по наклонным плоскостям, собственным весом заклинивается на них и плотно прижимается к дверной колоде.

Механизм открывания особыми рычагами поднимает дверь, выводит из крючьев, и дверь открывается вместе с механизмом в сторону. Эта очень удобная американская конструкция нашла применение и на наших заводах.

Полотнища дверей делаются из дерева и из железа. В том и в другом случаях дверь должна быть легкой, не должна деформироваться от влияния влаги и быть достаточно гибкой, чтобы плотно прилегать к дверной колоде. Для лучшего прилегания двери по периметру колоды закрепляют резиновый шнур. Таким условиям удовлетворяет деревянное полотнище, тщательно вы-

¹ В США двери для сушил изготавливаются специальной фирмой.

полненное из легкой, сухой (влажностью 8—10%) сосны или ели. Конструкция полотнища двери показана на фиг. 16. Каркас двери состоит из трех рам, связанных из 25-мм теса. Рамы сплочены между собой латунными шурупами. Наружный вид двери показан на фиг. 17.

Внутренняя рама с двух сторон обшивается толем в два слоя. Поверх толя нашиваются вертикальные планки толщиной 10 мм с прозорами между планками. Дверь изнутри обшивается хорошо прокрашенным 9-фунтовым кровельным железом. Двери для больших проемов делаются с железным каркасом, заполняемым материалом, плохо проводящим тепло, обшитым с двух сторон легким листовым железом. Двери должны периодически прокрашиваться.

Известные нам конструкции механизма для открывания дверей принципиальной разницы не имеют. Лучшим из них остается механизм, где усилие рабочего, поднимающего дверь, передается системой рычагов без зубчаток. Правильно подсчитанная система рычагов вполне позволяет обойтись без большого усилия рабочего.

Г. П. ИВАНЦОВ.

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В СУШИЛАХ МНОГОКРАТНОГО НАСЫЩЕНИЯ ¹

ПРОЦЕСС СУШКИ В СУШИЛЕ МНОГОКРАТНОГО НАСЫЩЕНИЯ В $I-d$ -ДИАГРАММЕ

Прежде чем приступить к анализу естественной циркуляции, разберем рабочий процесс сушила многократного насыщения с помощью $I-d$ -диаграммы, являющийся орудием для каждого современного сушильщика ².

Напомним кратко некоторые свойства $I-d$ -диаграммы (фиг. 2, стр. 27) и основные формулы теплового расчета сушил.

Обозначим:

индекс₀ — относится к свойствам свежего (приточного) воздуха, попадающего в сушило из окружающей атмосферы;

индекс₁ — относится к состоянию воздуха перед входом в штабель;

индекс₂ — относится к состоянию воздуха, выходящего из материала (с этим состоянием он удаляется в отводящую трубу);

t, φ — температура (°C) и относительная влажность воздуха (%);

W — количество влаги, испаряемое в сушиле (кг/час);

d — влагосодержание воздуха, отнесенное на 1 кг сухого воздуха (г);

I — теплосодержание влажного воздуха, отнесенное на 1 кг содержащегося в нем сухого воздуха (Кал);

оно равно сумме теплосодержания 1 кг сухого воздуха и теплосодержания d г водяных паров, считая от 0°, причем в эту ве-

¹ Настоящая статья представляет собой переработку статьи „Расчет естественной циркуляции в сушилах многократного насыщения“, опубликованной в трудах БМТК, выпуск 2/272, 1928.

² Исчерпывающее изложение физики влажного воздуха и построение $I-d$ -диаграммы имеется в труде М. Ю. Лурье. „Сушильное дело“, изд. КУБУЧ, 1934.

личину *включается скрытая теплота испарения*, чем величина I , фигурирующая в теории сушки, отличается от тепло-содержания водяных паров, применяемого при расчетах печей, куда скрытая теплота испарения не входит:

$$I = c_s t + \frac{d}{1000} \cdot i_n = 0,24 t + \frac{d}{1000} \cdot i_n \quad (1)$$

где i — теплосодержание 1 кг водяных паров в *Кал/кг* (берется по паровым таблицам).

Расход сухого воздуха (кг) на испарение 1 кг влаги

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0} \quad (2)$$

Таблицу значений d , I и других параметров влажного воздуха см. на стр. 78.

Расход тепла на *испарение* 1 кг влаги в идеальном сушиле, без потерь, и на подогрев воздуха от t_0 до t_1 при условии, что температура материала (и влаги, в нем заключающейся) $\vartheta = 0^\circ$

$$q_0 = 1000 \cdot \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} \text{ Кал} \quad (3)$$

Если начальная температура материала равна ϑ , то расход тепла меньше на теплосодержание 1 кг влаги при этой температуре, т. е. на ϑ *Кал*.

$$q = 1000 \cdot \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} - \vartheta \quad (4)$$

В действительном сушиле расход тепла больше вследствие потерь тепла: 1) через ограждения сушила и на первоначальный прогрев их (q_5); 2) на прогрев сухого материала и влаги, которая в нем остается после сушки ($q_{пр}$), и 3) на прогрев транспортных устройств ($q_{ТР}$) и т. д.

В этом случае расход тепла выразится формулой

$$q = 1000 \cdot \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} - \vartheta + q_5 + q_{пр} + q_{ТР} \quad (5)$$

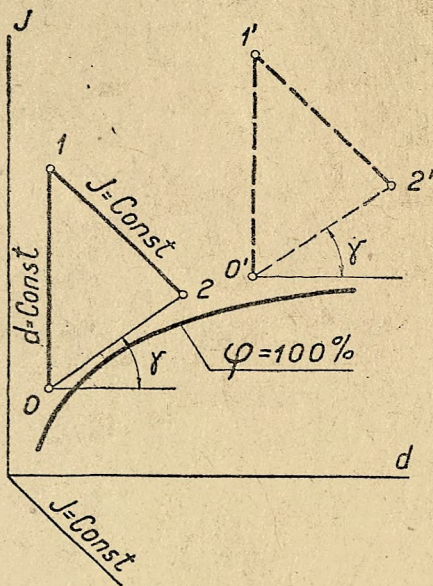
Разбираемые сушила для дерева принадлежат к категории воздушных сушил, в которых агентом переноса тепла от калорифера к сушильному материалу и удаления выделяющихся из него водяных паров служит *воздух*. Рабочий процесс такого сушила разбирается на *процесс нагрева* воздуха у калорифера, при котором *повышается его теплосодержание* от I_0 до I_1 , при постоянном влагосодержании $d_0 = \text{const}$, и на процесс собственно сушки, при котором происходит понижение температуры воздуха; выделяющееся при этом тепло расходуется на испарение влаги из материала и на покрытие всевозможных потерь. В идеальном сушиле без потерь при температуре испаряемой влаги $\vartheta = 0^\circ$, этот процесс идет при постоянном теплосодержании $I = \text{const}$. Поэтому в $I-d$ -диаграмме, построенной в координатах I и d , процесс нагрева воздуха изобра-

жается вертикальной прямой т. е. $d = \text{const}$, а процесс сушки — наклонной прямой $I = \text{const}$.

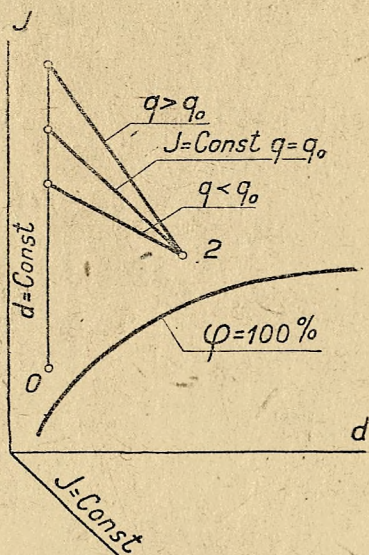
На фиг. 1 дана схема процесса идеального сушила однократного насыщения в $I-d$ -диаграмме.

Расход тепла q в этом случае определяется уравнением (3), в которое входят разность теплосодержаний ($I_2 - I_0$) и разность влагосодержаний ($d_2 - d_0$); это значит, что перенесение процесса в $I-d$ -диаграмме параллельно самому себе, например в положение, показанное пунктиром, не вызывает изменения расхода тепла q_0 . Проф. К. Mollieг доказал, что q может быть выражено как функция только угла γ в следующей форме:

$$q_0 = m (1 + \text{tg } \gamma) \quad (6)$$



Фиг. 1.



Фиг. 2.

где m зависит от масштаба диаграммы; в частности, для малой диаграммы Теплотехнического института $m = 500$ и для большой $m = 400$.

Для действительного процесса, как указывалось выше, расход тепла

$$q = q_0 - \vartheta + q_0 + q_{\text{пр}} + q_{\text{тр}} \quad (7)$$

Если $q > q_0$, то процесс сушки идет с понижением I , т. е. $I_1 > I_2$, что в $I-d$ -диаграмме выражается более крутой прямой (фиг. 2), если $q < q_0$, то $I_1 < I_2$ и процесс идет по более пологой прямой.

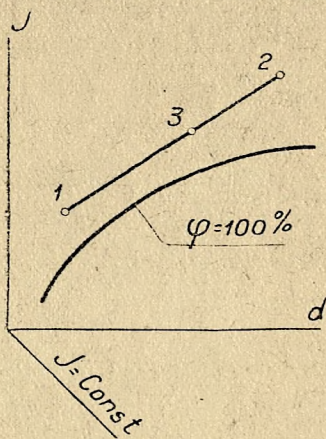
В сушилах часто имеет место процесс смешения влажного воздуха, характеризуемый какими-либо t_1 и φ_1 , с влажным воздухом, имеющим t_2 и φ_2 . Пусть количество сухого воздуха

в первом случае равно G_1 , во втором G_2 ; требуется найти и t_3 и φ_3 смеси.

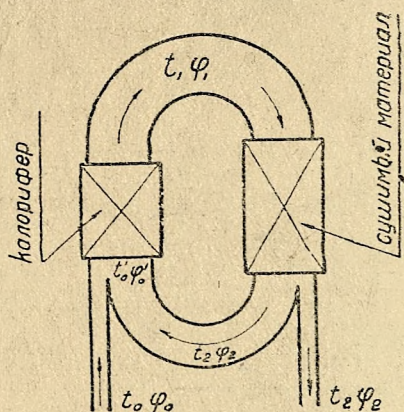
Эта задача решается с помощью $I-d$ -диаграммы следующим образом (фиг. 3): пусть точки 1 и 2 характеризуют состояние воздуха перед смешением. Соединяем их прямой. Нетрудно доказать, что точка, характеризующая состояние смеси (точка 3), лежит на этой прямой. Положение же ее определяется пропорцией смешиваемых частей, а именно отрезки 1—3 и 3—2 обратно пропорциональны первоначальному количеству воздуха, т. е.

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{1-3}{3-2} \quad (8)$$

Перейдем к изображению процесса *сушила многократного насыщения* в $I-d$ -диаграмме. На фиг. 4 изображена схема воздушных потоков, в сушиле многократного насыщения как с естественной, так и с принудительной циркуляцией.



Фиг. 3.



Фиг. 4.

Свежий воздух, имеющий t_0 и φ_0 , смешивается с отработанным воздухом, имеющим t_2 и φ_2 , и смесь приобретает состояние, характеризуемое t_0' и φ_0' . Проходя через калорифер, она нагревается, причем температура и влажность ее принимают значения t_1 и φ_1 . После этого она поступает в штабель сушимогo материала, из которого она выходит, имея t_2 и φ_2 . Некоторая часть этого воздуха удаляется из сушила, главная же масса его направляется снова к калориферу. Этот процесс в $I-d$ -диаграмме представлен на фиг. 5.

Расход воздуха и тепла на сушку в этом случае определяется попрежнему уравнениями (2) и (5).

Введем понятие „кратность циркуляции“, понимая под этим отношение количества циркулирующего сухого воздуха (пронизывающего калорифер и штабель материала) к количеству сменяемого сухого воздуха, т. е. к количеству сухого све-

жего воздуха или к равному ему количеству сухого воздуха в отработанном воздухе, удаляемом в трубу.

Кратность циркуляции

$$h = \frac{0-2}{0'-2} = \frac{d_2-d_1}{\Delta d} \quad (9)$$

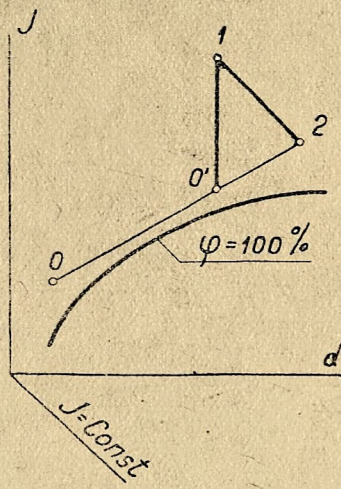
где $\Delta d = d_2 - d_1$.

Рассмотрим изменение удельного веса влажного воздуха в процессе сушки, что необходимо знать для возможности расчета естественной циркуляции.

Изменение удельного веса влажного воздуха при нагреве ($d = \text{const}$) от t до $(t + \Delta t)$ совершается по тем же законам, что и у сухих газов, а именно:

$$\gamma_{t+\Delta t} = \gamma_t \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha(t + \Delta t)} \quad (10)$$

При собственно сушке происходит, с одной стороны, *утяжеление* воздуха вследствие охлаждения, с другой стороны, — *облегчение* вследствие увеличения его влагосодержания, так как удельный вес водяных паров на 40% меньше удельного веса сухого воздуха. Расчеты показали, что в процессе сушки, идущем при $I = \text{const}$ происходит все же *утяжеление* воздуха, но в несколько меньшей степени, чем это имело бы место при охлаждении его на то же количество градусов, но без увеличения влагосодержания. Например: пусть воздух, имеющий вначале 45° и $\varphi = 50\%$, охлаждается на 5° в одном случае при $d = \text{const}$, а в другом случае при $I = \text{const}$.



Фиг. 5.

Начальный удельный вес воздуха $\gamma_1 = 1,069$.

Приращение удельного веса в первом случае (при $d = \text{const}$) равно

$$\Delta \gamma = \gamma_2 - \gamma_1 = \gamma_1 \cdot \frac{273 + 45}{273 + 40} - \gamma_1 = 0,0160 \gamma_1 = 0,0171.$$

Во втором случае, когда охлаждение воздуха на те же 5° происходит вследствие испарения влаги из материала, приращение влагосодержания воздуха составит на 1 кг сухого воздуха (считаем, что процесс идет по $I = \text{const}$):

$$\Delta d = d_2 - d_1 = 34,0 - 31,8 = 2,2 \text{ г/кг сухого воздуха,}$$

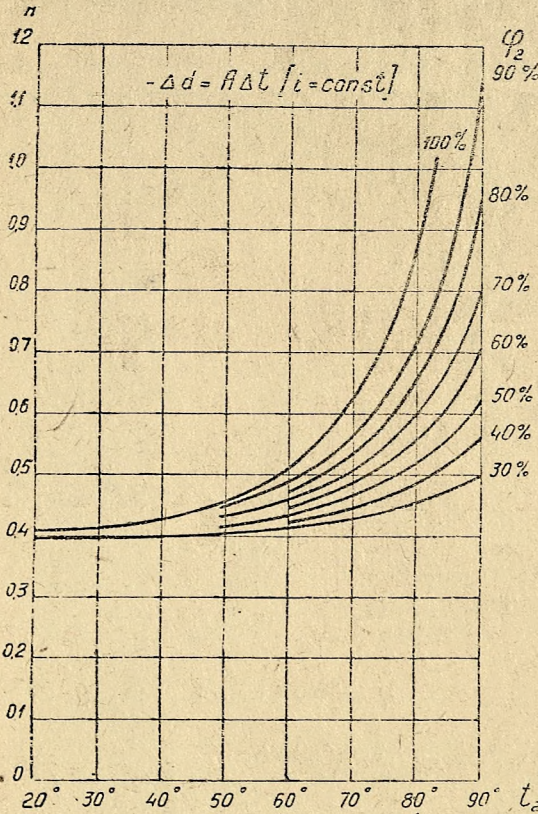
где d_2 и d_1 — влагосодержания воздуха до и после охлаждения, взятые по $I-d$ -диаграмме.

При увеличении влагосодержания на $2,2 \frac{г}{кг}$ вес смеси увеличивается с $1,0318$ до $1,0340$ кг, объем же уменьшается с

$$\frac{1,0318}{\gamma_1} = \frac{1,0318}{1,069} = 0,9652 \text{ м}^3$$

до

$$0,9652 \cdot \frac{273 + 40}{273 + 45} + \frac{0,0022}{0,700} = 0,9498 + 0,0032 = 0,9530 \text{ м}^3$$



Фиг. 6.

где $0,700$ — удельный вес водяного пара при $t = 40^\circ$.

Удельный вес смеси после охлаждения при $I = \text{const}$ будет равен:

$$\gamma_2 = \frac{1,0340}{0,9530} = 1,085 \text{ кг/м}^3$$

Приращение удельного веса:

$$\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1 = 1,085 - 1,069 = 0,016$$

При процессе же $d = \text{const}$ получено приращение $0,0171$; таким образом приращение удельного веса в случае $I = \text{const}$ составляет $0,94$ от приращения такового при обычном охлаждении по $d = \text{const}$. Для различных областей $I-d$ диаграммы эта величина принимает различные значения. Для дальнейших расчетов примем ее среднее значение $0,90$.

В дальнейшем понадобится еще связь приращения удельного влагосодержания $\Delta d = d_2 - d_1$ и температуры $\Delta t = t_1 - t_2$ при омывании материала воздухом.

Обозначим их отношение в случае процесса $I = \text{const}$ через

$$A_0 = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (11)$$

Эту величину найдем из уравнения (1)

$$I = 0,24 t + i_n \cdot \frac{d}{1000} = \text{const}$$

Найдем производную d по t при $I = \text{const}$

$$d = \frac{1000 I - 240 t}{i_n} = \frac{1000 I - 240 t}{595 + 0,47 t}$$

$$A_0 = \frac{dd}{dt} = - \frac{240 i_n + 470 I - 113 t}{i_n^2} \quad (12)$$

По этому уравнению вычислен график на фиг. 6, показывающий, что средняя величина A_0 может быть принята равной около 0,5.

Если температура материала равна ϑ_0 и потери тепла отсутствуют, то закон изменения d и t при омывании материала воздухом будет уже выражаться не уравнением (1), а следующим выражением:

$$I' = 0,24 t + (i_n - \vartheta) \cdot \frac{d}{1000} = \text{const} \quad (13)$$

Уравнение (12) в этом случае примет вид:

$$A = \frac{dd}{dt} = - \frac{240 (i_n - \vartheta) + 470 I' - 113 t}{(i_n - \vartheta)^2} \approx A_0 \cdot \frac{i_n}{i_n - \vartheta} \quad (13')$$

ОСНОВНОЕ СВОЙСТВО ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Основным требованием, предъявляемым к сушилам любого назначения, является равномерность сушки всего сушимого материала. Для этого необходимо иметь возможно меньшие перепады температуры и относительной влажности воздуха при омывании им материала и достаточную скорость при этом.

Могут ли перепады температур, исчисляемые градусами, создать достаточные скорости циркуляции воздуха? Ответ на этот вопрос дает гидравлическая теория движения газов проф. В. Е. Грум-Гржимайло, вернее тот взгляд на природу естественного движения газов, который дает теория. Для более рельефного выяснения сущности вопроса осветим его в несколько абстрактной форме.

Предположим, что имеются два сообщающихся столба газов высотой H при t и $(t + \Delta t)$ (фиг. 7).

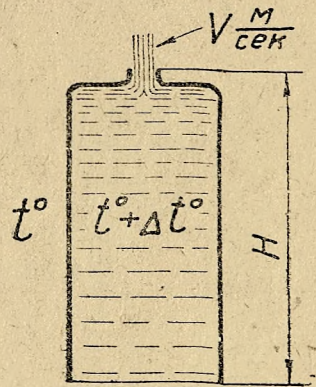
Разность удельных весов столбов создаст наверху разность давлений

$$\Delta p = H(\gamma_t - \gamma_{t+\Delta t}) \text{ мм вод. ст.}$$

Преобразуем эту формулу:

$$\Delta p = H \gamma_{t+\Delta t} \left(\frac{\gamma_t}{\gamma_{t+\Delta t}} - 1 \right) = H \gamma_{t+\Delta t} \left(\frac{\frac{\gamma_0}{1 + \alpha t}}{\frac{\gamma_0}{1 + \alpha(t + \Delta t)}} - 1 \right) =$$

$$= H \gamma_{t+\Delta t} \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta t}{1 + \alpha t} = H \gamma_{t+\Delta t} \cdot \frac{\Delta t}{273 + t}$$

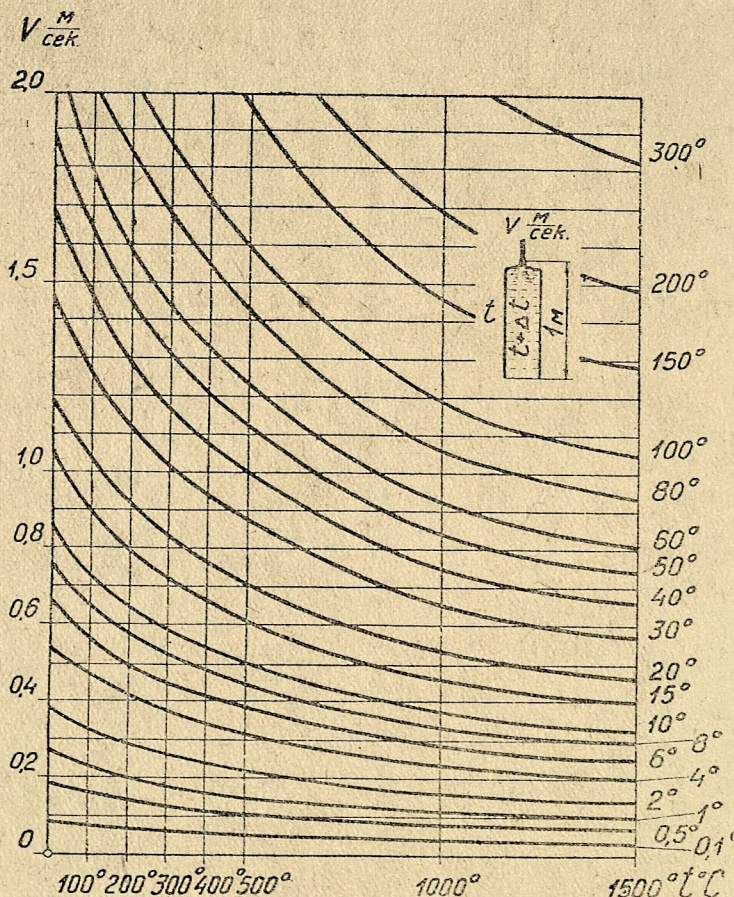


Фиг. 7.

В дальнейшем понадобится другая форма этого же выражения.

Вынося за скобки γ_t вместо $(\gamma_{t+\Delta t})$, получаем

$$\Delta p = H\gamma_t \cdot \frac{\Delta t}{273 + t + \Delta t} \quad (14)$$



Фиг. 8.

Скорость истечения газа под влиянием разности давлений в идеальном случае (при отсутствии потерь) будет

$$v = \sqrt{2g \cdot \frac{\Delta p}{\gamma_{t+\Delta t}}} = \sqrt{2gH \cdot \frac{\Delta t}{273 + t}} \quad (15)$$

На фиг. 8 дан график этого уравнения, вычисленный для случая $H = 1$ м.

Для получения общей картины явления в графике взяты очень широкие пределы изменения t (от 0 до 1500°) и Δt (от 0,1 до 300°).

Первый вывод, который можно сделать из рассмотрения графика, заключается в том, что малейшие разницы температур, которые даже не могут быть уловлены приборами, дают уже заметные скорости: столбы высотой в 1 м 1500 и 1500°, 1 (!) дают скорость 3,2 см/сек, при 1500 и 1501° — 10,5 см/сек. При увеличении разности температур скорость возрастает, но темп этого возрастания замедляется.

Второй вывод касается влияния температуры на скорость истечения. Из графика видно, что *влияние температуры t на скорость истечения при заданном Δt весьма невелико*: так при изменении от 0 до 100° скорость падает всего на 14%. В условиях обычных сушил, при $t = 50-90^\circ$ и $\Delta t = 4^\circ$, теоретическая скорость будет равна 0,45—0,50 м/сек, действительная же скорость будет меньше, однако, как покажут дальнейшие подсчеты, сможет обеспечить достаточную равномерность сушки.

Итак, рассмотрение явления в общем виде дает положительный ответ на поставленный вопрос: *малые перепады температур при известных условиях могут создать нужные скорости*.

ТЕОРИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В СУШИЛЕ

На фиг. 3 (стр. 35) изображена классическая схема конструкции сушила системы прбф. В. Е. Грум-Гржимайло и схема движения воздуха.

Поток нагреваемого калориферами циркулирующего воздуха поднимается между стенками сушила и экраном к потолку, откуда он опускается вниз, омывая сушимый материал и охлаждаясь. Наиболее охладившиеся струи падают как более тяжелые на пол сушила, откуда они непрерывно удаляются в отводящий канал, главная же масса воздуха снова направляется к нагревательным приборам. Холодный свежий воздух подается через отверстия в приточном канале и направляется непосредственно на нагревательные приборы.

Обычно в сушилах для дерева количество циркулирующего воздуха в 15—30 раз больше объема сменяемого воздуха. В отдельные периоды сушки, например в период первоначального прогрева материала, обработки высокой влажностью и т. д., смена воздуха совсем прекращается путем закрывания шиберов в отводящей трубе; на процессе циркуляции воздуха это не отзывается. Это позволяет рассматривать *процесс естественной циркуляции независимо от процесса смены воздуха, а сушило — как замкнутый трубопровод, расположенный в вертикальной плоскости и заполненный жидкостью-газом, удельный вес которой имеет различные значения в восходящем и нисходящем потоках, что и является причиной ее циркуляции*.

Предположим, что в сушиле установлен определенный режим, поддерживаемый без изменения в течение некоторого промежутка времени, и что материал уже прогрет и дальнейшее изменение его температуры таково, что им можно пренебречь;

тогда устанавливается равновесие между следующими величинами.

1. Установившийся режим сушки, т. е. средние значения t и φ циркулирующего воздуха обуславливают испарение влаги из материала в количестве W кг/час, переходящей в виде водяных паров в циркулирующий воздух и вызывающий соответственное увеличение его влагосодержания при соприкосновении с материалом.

2. Гидростатический напор, получающийся вследствие разности удельных весов опускающегося и поднимающегося потоков воздуха, в точности равен сумме потерь напора на преодоление сопротивлений на пути циркулирующего воздуха.

Выразим аналитически связь между испарением влаги из штабеля и увлажнением циркулирующего воздуха. Пусть поток циркулирующего воздуха через штабель равен V м³/сек; умножением этой величины на удельный вес воздуха γ получаем весовой поток γV кг/сек. Приращение влагосодержания, отнесенное к 1 кг сухого воздуха, равно Δd , а к 1 кг влажного воздуха (в z) равно:

$$\frac{\Delta d}{1 + \frac{d}{1000}}$$

Приращение влагосодержания всего потока в течение 1 сек. равно (z):

$$\gamma V \frac{\Delta d}{1 + \frac{d}{1000}}$$

Эта величина равна количеству влаги, испаряющейся из материала в 1 сек. (z):

$$\frac{W \cdot 1000}{3600} = \frac{W}{3,6}$$

Приравнивая получившиеся выражения, получаем:

$$\frac{W}{3,6} = \gamma V \cdot \frac{\Delta d}{1 + \frac{d}{1000}} \quad (16)$$

Заменяя в этом выражении Δd на $A \cdot \Delta t$ согласно уравнению (13'), получаем первое уравнение:

$$\boxed{\frac{W}{3,6} = \gamma V \cdot \frac{A \cdot \Delta t}{1 + \frac{d}{1000}}} \quad (17)$$

Это уравнение связывает интенсивность влагоотдачи W с величиной циркулирующего потока V и перепадом температуры воздуха Δt при омывании материала.

В сушиле с принудительной циркуляцией при заданных W и Δt по этой формуле определяется производительность вентилятора. В сушиле с естественной циркуляцией, где циркуляция

вызывается разностью удельных весов циркулирующего воздуха, т. е. в конечном счете Δt ; величины Δt и V в свою очередь связаны. Эту связь получим из рассмотрения гидравлики процесса.

Выше (стр. 62) была выведена формула (14), дающая связь между напором и перепадом температур:

$$\Delta p = H\gamma_t \cdot \frac{\Delta t}{273 + t + \Delta t}$$

В случае сушила напор Δp будет меньше, во-первых, вследствие того что температура нисходящего потока воздуха постепенно падает от t_1 до $t_2 = t_1 - \Delta t$ и, во-вторых, потому, что при этом происходит увлажнение воздуха, вследствие чего увеличение удельного веса составляет 0,90 от теоретического.

Уменьшение напора вследствие первой причины учитываем коэффициентом C , представляющим собой отношение разности средних температур восходящего и нисходящего потоков воздуха к полной разности температур. Так, если нагревательные приборы расположены у основания восходящего столба, то средняя температура его может считаться равной t_1 ; если падение температуры воздуха в штабеле материала идет по закону прямой линии от t_1 до t_2 , то средняя температура нисходящего столба равна:

$$t_1 - \frac{t_1 - t_2}{2}$$

В этом случае

$$C = \frac{t_1 - \left(t_1 - \frac{t_1 - t_2}{2}\right)}{t_1 - t_2} = 0,5$$

Потерю напора вследствие увлажнения воздуха учитываем коэффициентом 0,9, как это было выведено выше. Кроме того для упрощения откидываем в знаменателе формулы (14) величину Δt , что дает ошибку меньше 3%, тогда формула принимает вид:

$$\Delta p = 0,9 CH \gamma_2 \cdot \frac{\Delta t}{273 + t_2} \quad (18)$$

Потеря напора на преодоление сопротивлений движению воздуха может быть подсчитана по общеизвестному способу и представлена в следующем виде:

$$\Delta p = \xi \gamma \cdot \frac{v^2}{2g} + \xi_1 \gamma' \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \xi_2 \gamma'' \cdot \frac{v_2^2}{2g} + \dots$$

где ξ_n — коэффициенты местных сопротивлений и потерь на трение.

Обозначения без индекса относятся к скорости у материала подвергаемого сушке.

Так как удельный вес воздуха, циркулирующего в сушале меняется мало, максимум на 3%, то при вычислении Δp можно

считать, что удельный вес не меняется и равен γ_2 . Это даст весьма незначительную погрешность, тем более что точных значений коэффициентов сопротивления мы пока не имеем, и погрешность при выборе их значительно больше.

Преобразуем написанное выражение (17):

$$\Delta p = \gamma_2 \cdot \frac{v^2}{2g} \left[\xi + \xi_1 \left(\frac{v_1}{v} \right)^2 + \xi_2 \left(\frac{v_2}{v} \right)^2 + \dots \right]$$

Заменим отношения скоростей отношением сечений:

$$\Delta p = \gamma_2 \cdot \frac{v^2}{2g} \left[\xi + \xi_1 \left(\frac{f}{f_1} \right)^2 + \xi_2 \left(\frac{f}{f_2} \right)^2 + \dots \right]$$

Вынесем за скобки f^2

$$\begin{aligned} \Delta p &= \gamma_2 \frac{v^2}{2g} \cdot f^2 \left(\frac{\xi}{f^2} + \frac{\xi_1}{f_1^2} + \frac{\xi_2}{f_2^2} + \dots \right) = \\ &= \gamma_2 \frac{(vf)^2}{2g} \sum \frac{\xi}{f^2} = \frac{\gamma_2}{2g} \cdot V^2 \sum \frac{\xi}{f^2} \end{aligned} \quad (19)$$

Приравнявая выражения (18) и (19), получаем искомую связь Δt и циркулирующего потока:

$$\boxed{0,9 CH \gamma_2 \cdot \frac{\Delta t}{273 + t_2} = \frac{\gamma_2}{2g} \cdot V^2 \sum \frac{\xi}{f^2}} \quad (20)$$

Итак, имеем два уравнения (17) и (20) с двумя неизвестными Δt и V .

Исключая из этих уравнений величину V и заменяя γ_2 через

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha t} = \gamma_0 \cdot \frac{273}{273 + t}$$

будем иметь ¹

$$\Delta t^3 = \frac{1}{273^2 \cdot 2g \cdot 0,9 \cdot 3,6^2} (273 + t_2)^3 \cdot \frac{W^2 \left(1 + \frac{d_2}{1000} \right)^2 \sum \frac{\xi}{f^2}}{A^2 \gamma_0^2 HC} \quad (21)$$

Извлекая корень кубический и вычисляя постоянные, получаем:

$$\boxed{\Delta t = 0,00389 (273 + t_2) \sqrt[3]{\left[\frac{W \left(1 + \frac{d_2}{1000} \right)^2 \sum \frac{\xi}{f^2}}{A \gamma_0} \right]}} \quad (22)$$

Это уравнение является основным при расчете сушила — оно непосредственно дает величину, которая является критерием равномерности сушки. Чем меньше должна быть разница

¹ Здесь γ_0 — удельный вес влажного воздуха, приведенный к 0°; не следует смешивать его с удельным весом приточного воздуха, имеющего то же обозначение.

между режимами сушки сверху и внизу, тем меньше должно быть Δt . Предельная допустимая разность режимов определяется качествами материала из опыта.

Аналогично получаем значение V путем исключения Δt из уравнений (17) и (20) (в m^3/sec):

$$V = 0,262 \sqrt[3]{\frac{W \left(1 + \frac{d_2}{1000}\right)}{A \gamma_0} \cdot \frac{HC}{\sum \frac{\xi}{f^2}}} \quad (23)$$

Введем обозначение:

$$W \frac{1 + \frac{d_2}{1000}}{A \gamma_0} = WB = R \quad (24)$$

Величину R назовем „фактором режима“, так как все элементы его зависят от температуры и влажности воздуха в сушиле; A кроме того зависит еще от температуры материала (см. формулу 13'), но последняя тоже есть функция t и φ ; так как в сушиле с естественной циркуляцией разности температур между воздухом и материалом невелики, то примем ее равной температуре мокрого термометра.

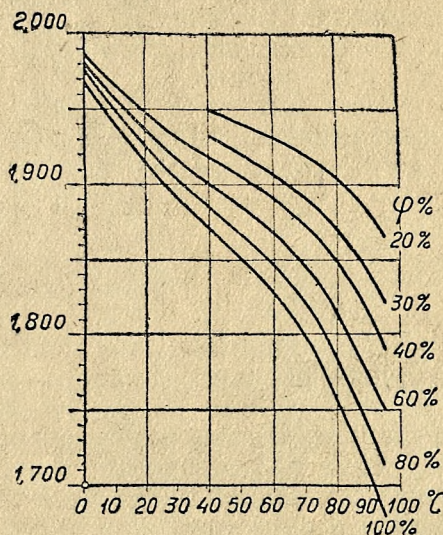
На фиг. 9 дан график значений B в зависимости от t и φ , а в таблице (стр. 78) — числовые значения.

Множитель K под радикалом (формула (22) можно назвать конструктивным фактором

$$K = \frac{HC}{\sum \frac{\xi}{f^2}} \quad (25)$$

Он зависит только от конструкции сушила и расположения в нем материала ¹.

Обратим внимание на то, что высота камеры входит в формулу (25) первой степени, а проходные сечения — в квадрате, т. е. для получения наибольшей равномерности сушки большее значение имеют проходные сечения для циркулирующего воздуха, чем высота камеры.



Фиг. 9.

¹ Строго говоря, величина K не является величиной постоянной в процессе сушки. Если допущено большое Δt при большой влажности воздуха, вначале главную массу влаги будут отдавать верхние слои материала, величина C будет больше средней; к концу сушки будут интенсивно сохнуть нижние слои материала и величина C уменьшится.

Формулы (22) и (23) получают вид:

$$t = 0,00389 (273 + t_2) \sqrt[3]{\frac{R^2}{K}} \quad (26)$$

$$V = 0,262 \sqrt[3]{RK} \quad (27)$$

откуда скорость омывания материала (m/sec):

$$v = 0,262 \frac{1}{f} \sqrt[3]{RK} \quad (28)$$

Из этих уравнений нетрудно усмотреть влияние R и K на величины Δt и v . Изменение R гораздо больше влияет на Δt , чем на v .

Скорость является величиной весьма устойчивой, так как она пропорциональна корню кубическому из R .

Влияние конструктивного фактора K на изменение скорости аналогично влиянию R , тогда как на Δt это влияние обратное, т. е. с увеличением K уменьшается перепад температур Δt .

Таким образом увеличение K всегда выгодно для процесса сушки (Δt уменьшается, v увеличивается), тогда как R , повышая скорость циркуляции, одновременно увеличивает неравномерность сушки.

Чтобы выяснить сущность причины, возбуждающей в сушиле циркуляцию, решим уравнение (27) относительно R и уравнение (20) относительно Δt :

$$R = 55,7 \cdot \frac{1}{K} \cdot V^3 \quad (29)$$

$$\Delta t = \frac{273 + t}{0,9K} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (30)$$

Если вспомнить, что мощность вентилятора пропорциональна кубу его подачи, а напор — квадрату, то будет ясно, что *тепловой механизм имеет полную аналогию с вентилятором*: напору вентилятора соответствует здесь „температурный напор“ (величина Δt), мощности вентилятора здесь соответствует величина R , которая пропорциональна количеству тепла, переносимого в единицу времени от калорифера к материалу, подвергаемому сушке. Чем интенсивнее идет влагоотдача, тем энергичнее циркуляция воздуха в сушиле.

Выведем уравнение циркуляции для периода прогрева материала в начале сушки. В этом случае охлаждение циркулирующего воздуха, омывающего материал, происходит за счет поглощения тепла нагревающимся материалом.

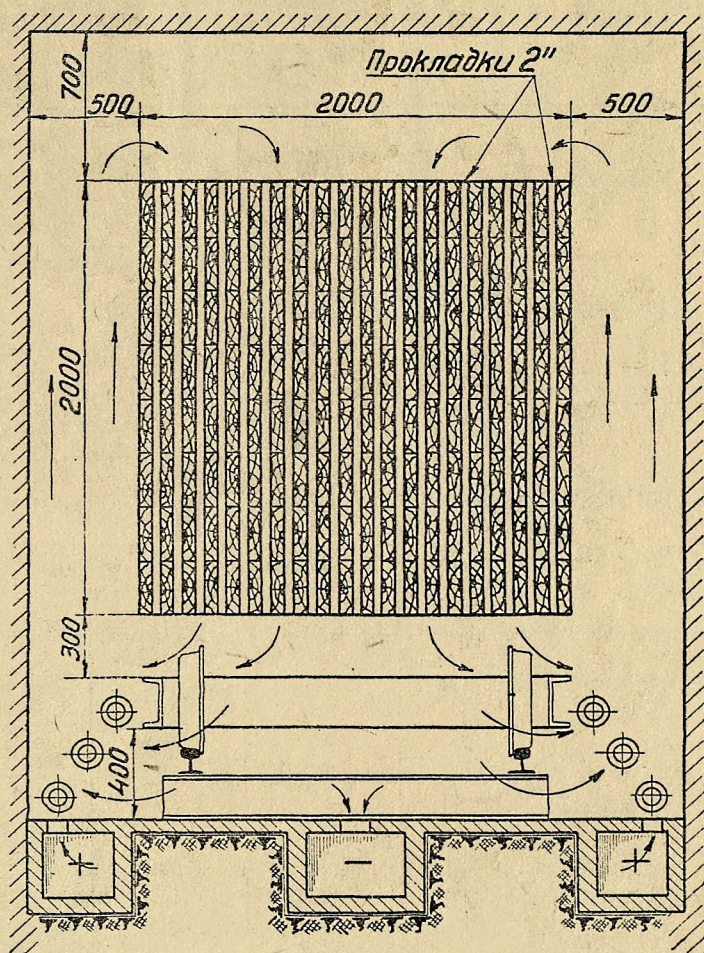
Уравнение секундного количества тепла, поглощаемого нагреваемым материалом, будет следующее

$$Q = \frac{V \cdot 273}{273 + t} \cdot c \cdot \Delta t \quad (31)$$

где Q — тепло, поглощаемое материалом в течение 1 сек. (Кал)
 c — теплоемкость 1 m^3 воздуха (Кал/ $m^3 \cdot ^\circ C$).

Уравнение (18) остается в силе, но из него выпадает коэффициент 0,9; конструктивный фактор не изменяется; фактор режима примет следующий вид:

$$R = \frac{Q}{C} \quad (32)$$



Фиг. 10. Вертикальная штабелевка досок.

В формулах (26) и (27) изменятся лишь числовые коэффициенты:

$$\Delta t = 0,00825 (273 + t_2) \sqrt[3]{\frac{R^2}{K}} \quad (33)$$

$$V = 0,403 \sqrt[3]{RK} \quad (34)$$

С помощью этих зависимостей может рассчитываться циркуляция в печах.

Весьма важным является вопрос о соответствии штабелевки материала и направлении циркуляции воздуха. Общим правилом является необходимость такой штабелевки, при которой циркулирующий воздух омывал бы основную влагоотдающую поверхность материала. Поэтому при естественной циркуляции безусловные преимущества имеет вертикальная штабелевка материала, изображенная на фиг. 10. При такой штабелевке поток циркулирующего воздуха омывает широкую часть доски,

Таблица 1

Материал	Толщина мм	Срок сушки сутки	Среднее значение W г/м ² ·час	
Сосновые доски шириной 220 мм	13	1,75	34,5	
	25	3	35,7	
	$W_{\text{нач.}} 65\%$	50	6	34,1
	$W_{\text{кон.}} 10\%$	75	9	30,0
Березовые доски шириной 220 мм	13	4	12,9	
	25	15	6,2	
	$W_{\text{нач.}} 50\%$	50	30	5,9
	$W_{\text{кон.}} 10\%$	75	45	5,3
Дубовые доски шириной 220 мм	13	8	7,6	
	25	30	3,7	
	$W_{\text{нач.}} 50\%$	50	60	3,5
	$W_{\text{кон.}} 10\%$	75	90	3,1
Дубовые бруски шириной 85 мм	55	35	8,8	
	Дубовые бруски шириной 95 мм	75	45	8,4
	$W_{\text{нач.}} 50\%$			
$W_{\text{кон.}} 10\%$				

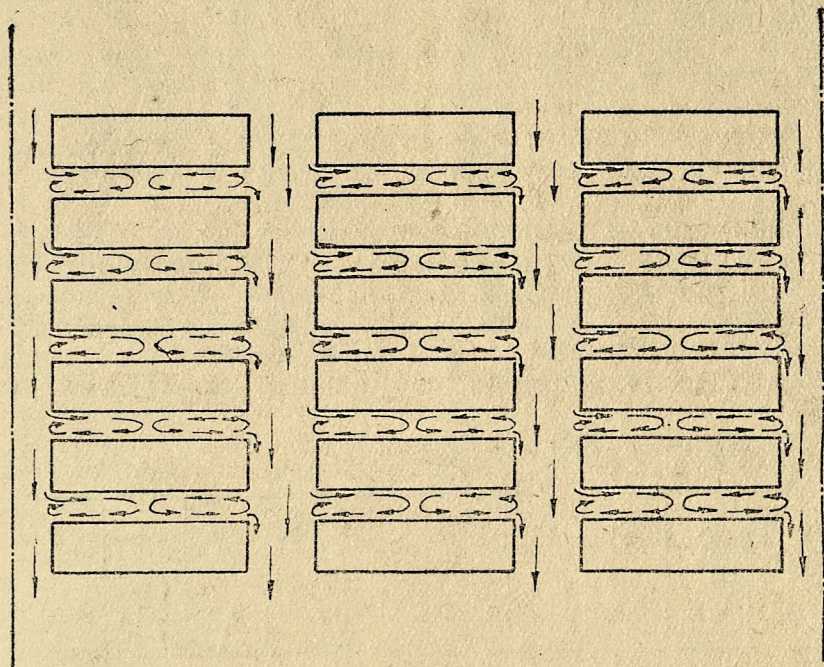
что безусловно обеспечивает равномерную сушку всей доски при весьма напряженной влагоотдаче последней. Кроме того такая штабелевка значительно повышает коэффициент загрузки камеры. Вертикальная штабелевка требует механизации загрузки, самозажимающихся вагонеток и т. д., что является серьезным препятствием к внедрению ее в промышленность.

Практика пошла по пути горизонтальной штабелевки материала, так как оказалось, что съем тех незначительных коли-

ществ влаги с поверхности сушеного материала вполне обеспечивается „микроциркуляцией“, которая возбуждается между досками основным током воздуха, что схематически изображено на фиг. 11.

Напряженность испарения влаги с 1 м² сушеной поверхности в час, определяемая существующими режимами для типовых случаев сведена в табл. 1.

Повышение напряженности испарения против данных, приведенных в таблице, безусловно потребовало бы приведения в соответствие штабелевки материала и направления движения воздуха. Так например, при сушке керамических материалов,



Фиг. 11.

где интенсивность сушки достигает 150—200 г/м²·час, это соответствие является совершенно необходимым.

Перейдем к выбору некоторых коэффициентов, входящих в уравнения циркуляции.

Высоту H следует брать равной высоте штабеля материала плюс половина расстояния от верха штабеля до потолка плюс половина расстояния от низа штабеля до пола сушилки, если нагревательные приборы расположены близко от пола сушилки, как это имеет место на фиг. 3 (стр. 35).

Наблюдения над движением воздуха в сушилке показали, что в нижней части их зона активного движения воздуха ограничивается горизонтальной плоскостью, касающейся нижней кромки нагревательных приборов; ниже этой плоскости распо-

ложен слой неподвижного охлажденного воздуха, постепенно сливающегося в отверстия отводящего канала, что показано на схеме циркуляции на фиг. 3 (стр. 35). Поэтому нагревательные приборы должны располагаться возможно ближе к полу сушила.

Коэффициент C , входящий в формулу (32), в случае нормальной конструкции, изображенной на фиг. 3 (стр. 35), может быть принят равным 0,5, как это было вычислено выше. Но в тех случаях когда нагревательные приборы распределяются на слишком большую высоту, что, конечно, весьма нерационально, коэффициент C должен быть вычислен указанным способом. При этом его значение будет меньше, что повлечет за собой увеличение Δt .

Расчет сопротивлений движению воздуха отличается от обычного вентиляционного расчета тем, что в нем отсутствует расход напора на создание скорости, так как дело идет о замкнутой, круговой циркуляции, т. е. должны учитываться лишь потери напора на местные сопротивления и на преодоление трения.

При заворотах циркулирующего потока на 90° обычно принимается общеизвестное значение $\xi = 1,5$, что соответствует повороту на 90° без закруглений. Сложнее обстоит дело с выбором коэффициентов сопротивления при проходе через штабель. Здесь воздух претерпевает ряд последовательных внезапных расширений и сужений. Эти коэффициенты известны из гидравлики.

Для внезапного сужения имеем:

$\frac{F_1}{F_2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ξ	0,47	0,42	0,37	0,33	0,29	0,25	0,20	0,15	0,09	0

Потеря отнесена к скоростному напору в суженном сечении F_1 .

Потерю от *внезапного расширения* можно считать по формуле Борда (относя потерю тоже к суженному сечению, а не к расширенному, как это обычно делается в гидравлике.

$$\xi = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2$$

$\frac{F_1}{F_2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ξ	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,09	0,04	0,01	0

Складывая потерю от внезапных сужений и расширений, получаем *потерю на одну доску* в зависимости от степени расширений струй

$\frac{F_1}{F_2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ξ	1,28	1,06	0,86	0,69	0,54	0,41	0,29	0,19	0,10	0

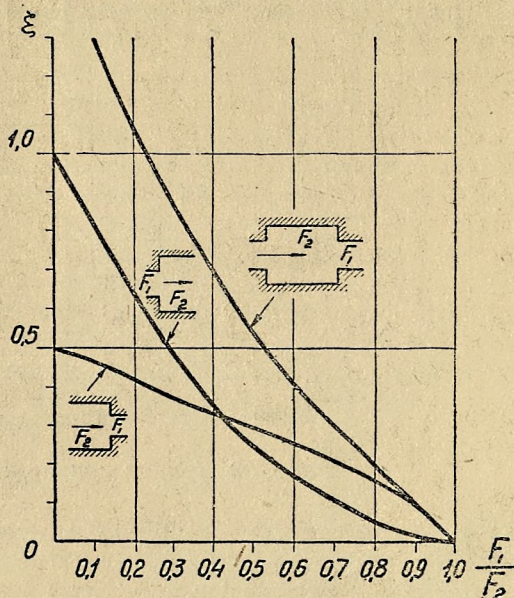
Эти зависимости даны на фиг. 12.

Формула внезапного сужения и формула Борда выведены для случая *полного расширения* струи. Здесь этого не будет, и *потеря будет меньше*, чем следует по этим формулам.

Так как значение этих коэффициентов весьма важно для расчета сушил, то по просьбе сушильного отдела Стальпроекта в 1930 г. в Ленинградской физико-технической лаборатории у проф. М. В. Кирпичева были поставлены *опыты на гидравлических моделях* с целью определения коэффициента сопротивления штабеля. Были изготовлены в масштабе $\frac{1}{10}$ модели штабеля из 25-миллиметровых досок, положенных горизонтально, и штабеля из 50-миллиметровых досок, сложенных на ребро (вертикальная штабелевка). В первом случае толщина прокладок равнялась 25 мм при расстоянии между досками 75 мм и во втором случае толщина прокладок была равна проходу между досками (37 мм). Высота обоих штабелей 2000 мм.

На фиг. 13 даны кривые полных сопротивлений этих штабелей в зависимости от скорости воздуха, движущегося через штабель. В случае горизонтальной штабелевки коэффициент полного сопротивления всего штабеля $\xi = 4-5$. Эта величина значительно меньше той, которая может быть определена с помощью графика фиг. 12.

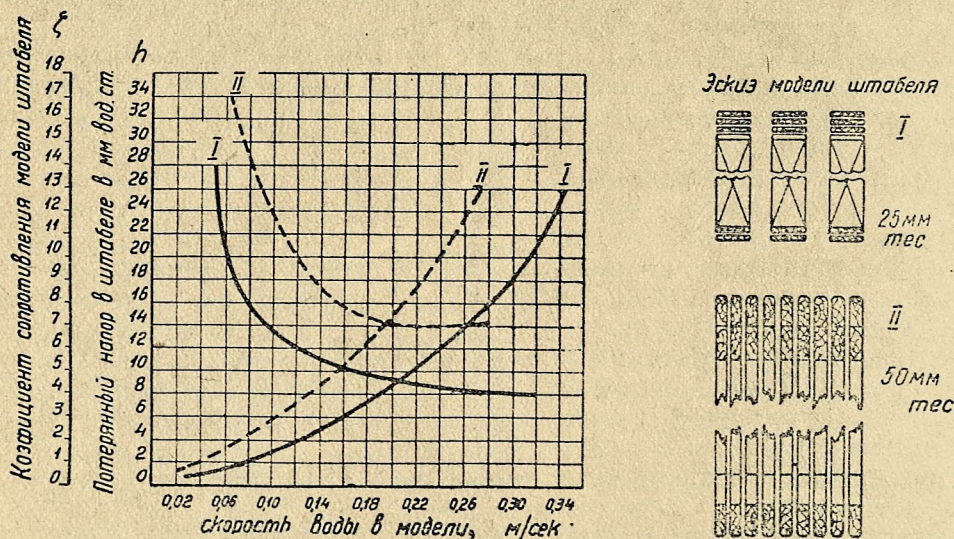
Типовая конструкция сушила отличается от схемы, изображенной на фиг. 3 (стр. 35) отсутствием экранов. Первоначально выполненные сушила системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло



Фиг. 12.

были снабжены экранами, а потом в целях конструктивного упрощения экраны были уничтожены. Проверка движения воздуха в камере показала, что оно совершается точно так же, как и при наличии экранов, и перепады температур при этом не меняются. Поэтому порядок расчета камеры без экранов ничем не отличается от расчета камеры с экранами.

Без экранов наблюдается некоторое ускорение сушки того материала, который обращен к нагревательным приборам; это объясняется воздействием прямого излучения их на материал. Поэтому если нагревательные приборы имеют высокую темпе-



Фиг. 13. Кривые сопротивления штабелей.

ратуру (при отоплении огневыми калориферами), следует все же делать небольшие экраны для предотвращения растрескивания материала, „видящего“ нагревательные приборы.

Вопрос о применении в том или другом случае сушиль с естественным или принудительным движением в настоящее время решается расчетом. Перепад температур, определяемый с помощью приведенных формул, дает прямой ответ на поставленный вопрос. Применение естественной циркуляции имеет, однако, некоторое специфическое преимущество, присущее только ей. Это преимущество заключается в свойстве саморегулирования процесса.

Струи остывшего воздуха появляются там, где материал влажный; они падают вниз, заменяются новыми и т. д. Более влажный материал возбуждает около себя более энергичную циркуляцию, чем уже подсохший. Таким образом происходит непрерывное выравнивание влажности в материале.

В сушиле с принудительной циркуляцией воздух распределяется по сушиму материалу в зависимости от гидравлических

сопротивлений. По путям наименьшего сопротивления имеет место резкая сушка, по путям большего сопротивления материал сохнет медленно, а если отвод воздуха производится не с пола камеры, то там может образоваться мешок холодного воздуха, и сушка совсем прекратится. Поэтому сушило с искусственной циркуляцией *нуждается в кропотливой регулировке*, чего абсолютно не требует сушило с естественной циркуляцией. Таким образом в сушиле с естественной циркуляцией мы имеем дело с неравномерностью лишь *по ходу воздуха*, в сушилах же с принудительной циркуляцией к этому добавляется еще *неравномерность сушки по сечению сушила*.

Благодаря свойству саморегулирования, в сушилах наблюдается прекрасная равномерность температур в горизонтальных плоскостях. В камерах с правильно спроектированным отопительным и вентиляционным оборудованием перепады по длине камеры как вверху, так и внизу обычно не превышают 2—3°.

В то время как проектирование устройств с естественной циркуляцией целиком требует соблюдения небольшого числа общеизвестных правил, вытекающих из гидравлической теории движения газов, при проектировании устройств с принудительным движением воздуха расчет движения последнего не может быть произведен. Единственным способом надежного проектирования этих устройств является *проверка движения газов в них на гидравлических моделях*, с последующим коррективом конструкции на основании результатов испытания модели. Практика Стальпроекта, располагающего модельной лабораторией, показала полную целесообразность и экономическую эффективность подобного способа проектирования всевозможных устройств с принудительным движением газов.

О ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ СУШИЛ ДЛЯ ДЕРЕВА

Для получения максимальной равномерности сушки по длине камеры отопительное и вентиляционное оборудование камеры должно снабжать ее теплом, свежим воздухом и отбирать отработанный воздух *равномерно вдоль всей ее длины*. Для обеспечения этого требования цепи ребристых труб, которыми обычно отапливаются камеры, должны быть не больше 6 м, что, как показала практика, обеспечивает хорошую равномерность подачи тепла.

Конструкция приточного канала должна обеспечивать, во-первых, равномерную „раздачу“ воздуха по длине камеры, и во-вторых, начальная скорость струи холодного воздуха, фонтанирующего из отверстий приточного канала, должна обеспечить подъем ее выше уровня нагревательных приборов. Если этого не соблюсти, то холодный воздух, не достигнув отопительных приборов, как более тяжелый, упадет вниз и будет удален в отводящий канал.

Равномерность распределения воздуха будет обеспечена, если сумма проходных сечений всех отверстий будет в два раза

меньше проходного сечения канала. При таком соотношении скорость в канале в два раза меньше скорости воздуха в отверстиях и изменение первой по длине канала не сможет оказать существенного влияния на изменение второй. Такое же соотношение должно иметь место и в отводящем канале¹. В типовых камерах это отношение равно 1,72 для приточных каналов и 1,6 для отводящих. Скорость воздуха, выходящего из приточных отверстий, может быть определена по формуле фонтана, приведенной в книге „Пламенные печи“ проф. В. Е. Грум-Гржимайло (ч. II, стр. 25—26):

$$h = 0,7 \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_d - \gamma_n} \quad (35)$$

где h — высота подъема фонтана (м);

v — его начальная скорость (м/сек);

γ_n — удельный вес неподвижной среды (кг/м³);

γ_d — удельный вес движущейся струи (кг/м³).

(В „Пламенных печах“ в знаменателе стоит разность $(\gamma_n - \gamma_d)$, так как там разбирается случай фонтана горячего газа, направленного вниз в окружении холодного газа, здесь же имеем обратный случай.) Например для того чтобы струя холодного воздуха, имеющего $\gamma_d = 1,20$ кг/м³, поднялась на высоту $h = 0,5$ м в сушиле, где $t = 75^\circ$ и $\varphi = 60\%$, чему соответствует $\gamma_n = 0,908$ кг/м³, ее начальная скорость v должна быть равна (решаем уравнение 35 относительно v)

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{0,7} \cdot \frac{\gamma_d - \gamma_n}{\gamma_d}} = \sqrt{\frac{2g \cdot 0,5}{0,7} \cdot \frac{1,20 - 0,908}{1,20}} = 1,85 \text{ м/сек} \quad (36)$$

Поскольку подача свежего воздуха в сушило совершается без механических побудителей, для осуществления ее в камере должно быть разрежение на уровне отверстий приточного канала, покрывающее потери давления при движении воздуха по приточному каналу и истечении через отверстия. Это разрежение создается работой отводящей трубы сушила и регулируется шибером, установленным на ней (открытие шибера вызывает уменьшение сопротивлений движения отработанного воздуха, вследствие чего увеличивается разрежение в отводящем канале и на полу камеры). За счет увеличивающегося разрежения происходит увеличение подачи свежего воздуха через приточный канал.

Так как удельный вес воздуха внутри сушила меньше удельного веса наружного воздуха, то разность их давлений будет меняться по высоте камеры. Как известно из гидравлической теории, увеличение относительного давления при приращении высоты на 1 м равно:

$$\Delta p = \gamma_{\text{вн.}} - \gamma_{\text{нар.}} \text{ мм вод. ст.} \quad (37)$$

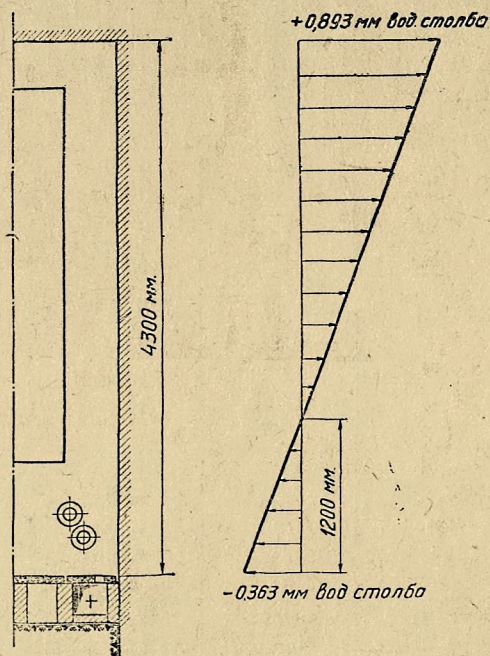
¹ Подробнее см. „Справочник конструктора печей“, стр. 50—59, ОНТИ, Гл. редакция литературы по черной металлургии, 1935.

Так, при вышеприведенных условиях

$$\Delta p = 1,20 - 0,908 = 0,292 \text{ мм вод. ст.}$$

При высоте типовой камеры 4,3 м давление под потолком будет больше давления у пола на $0,292 \cdot 4,3 = 1,256$ мм вод. ст.

Если разрежение на уровне пола равно 0,363 мм вод. ст., то под потолком получим уже давление, равное $0,363 + 1,256 = 0,893$ мм вод. ст. На фиг. 14 изображен график давлений в сушильной камере; он показывает, что в данном случае плоскость с давлением 0 (в этой плоскости атмосферное давление равно давлению внутри камеры) находится на высоте 0,44 м от пола камеры. (Приведенные цифры взяты из теплового расчета, стр. 119).



Фиг. 14. График давления в камере.

При расчете отводящей трубы слишком большие запасы в ее сечении вредны: если скорость воздуха в трубе очень мала (например меньше 1—1,5 м/сек), то труба может начать работать неполным сечением: отработанный воздух пойдет по одной стороне трубы, а по другой будет опускаться в трубу холодный атмосферный воздух. Это вызовет падение разрежения, создаваемого трубой, охлаждение ее и конденсацию влаги на ее стенках. Если труба большого сечения уже выстроена, то для улучшения ее работы рационально сузить ее выходное сечение, чтобы увеличить скорость воздуха в ней и прекратить тем самым попадание в трубу атмосферного воздуха.

Параметры влажного воздуха (барометр)

d — влагосодержание (г воды/кг абс. сух. возд.) Примерно $d = \frac{622}{\varphi \cdot P_H} - 1$

I — теплосодержание (Кал/кг абс. сух. возд.) $I = 0,240 \cdot t + i_{\text{вод. пар.}} \cdot \frac{d}{1000}$

t° \ φ	0%	10%	20%	30%	40%	
0° $i=596,8$	d	0,00	0,38	0,77	1,15	1,53
	I	0,00	0,23	0,46	0,69	0,91
	γ	1,267	1,267	1,266	1,265	1,265
	B_0	—	1,982	1,981	1,980	1,979
	B	—	—	—	—	1,99
5° $i=599,1$	d	0,00	0,55	1,09	1,64	2,19
	I	1,20	1,53	1,85	2,18	2,51
	γ	1,245	1,245	1,245	1,244	1,243
	B_0	—	1,983	1,984	1,983	1,982
	B	—	—	—	—	1,98
10° $i=601,4$	d	0,00	0,77	1,54	2,31	3,09
	I	2,39	2,86	3,32	3,78	4,25
	γ	1,223	1,222	1,222	1,221	1,220
	B_0	—	1,987	1,986	1,986	1,985
	B	—	—	—	—	1,97
15° $i=603,7$	d	0,00	1,07	2,14	3,22	4,30
	I	3,59	4,24	4,88	5,54	6,19
	γ	1,202	1,201	1,200	1,199	1,198
	B_0	—	1,991	1,990	1,990	1,988
	B	—	—	—	—	1,95
20° $i=605,9$	d	0,00	1,47	2,94	4,42	5,91
	I	4,79	5,68	6,57	7,47	8,37
	γ	1,181	1,181	1,180	1,178	1,177
	B_0	—	1,995	1,994	1,993	1,991
	B	—	—	—	—	1,94
25° $i=608,2$	d	0,00	1,99	3,99	6,01	8,04
	I	5,99	7,20	8,42	9,64	10,88
	γ	1,161	1,160	1,159	1,157	1,155
	B_0	—	2,002	2,001	1,999	1,997
	B	—	—	—	—	1,94
30° $i=610,5$	d	0,00	2,67	5,36	8,08	10,82
	I	7,19	8,82	10,46	12,12	13,79
	γ	1,142	1,140	1,138	1,137	1,134
	B_0	—	2,008	2,007	2,005	2,003
	B	—	—	—	—	1,93

трич. давление 745 мм рт. ст.)

γ — удельный вес (кг/м³) влажного воздуха $\left(\gamma = \frac{1 + \frac{d}{1000}}{v_0} \right)$; v_0 — см. „Изв. Т. И.“,

№ 1, 1927;

$B = B_0 \cdot \frac{i_{\text{вод. пар.}} - \vartheta}{i_{\text{вод. пар.}}}$; (ϑ — температура материала)

	50%	60%	70%	75%	80%	90%	100%
	1,92	2,30	2,69	2,88	3,07	3,46	3,85
	1,15	1,37	1,61	1,72	1,83	2,06	2,30
	1,265	1,266	1,265	1,265	1,265	1,265	1,264
	1,977	1,976	1,974	1,974	1,975	1,972	1,970
	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,97	1,97
	2,74	3,29	3,85	4,13	4,40	4,95	5,51
	2,84	3,17	3,50	3,66	3,83	4,16	4,50
	1,243	1,242	1,241	1,240	1,240	1,239	1,240
	1,980	1,979	1,977	1,977	1,976	1,975	1,973
	1,97	1,97	1,97	1,97	1,96	1,96	1,96
	3,87	4,65	5,43	5,82	6,21	7,00	7,78
	4,72	5,19	5,66	5,90	6,13	6,60	7,08
	1,220	1,219	1,219	1,219	1,218	1,217	1,216
	1,983	1,981	1,980	1,979	1,978	1,977	1,975
	1,96	1,96	1,95	1,95	1,95	1,95	1,94
	5,38	6,47	7,56	8,11	8,66	9,76	10,86
	6,84	7,50	8,16	8,49	8,82	9,48	10,15
	1,198	1,196	1,195	1,195	1,194	1,194	1,193
	1,986	1,985	1,983	1,982	1,981	1,980	1,978
	1,95	1,95	1,94	1,94	1,94	1,93	1,93
	7,41	8,91	10,42	11,18	11,94	13,46	15,00
	9,28	10,19	11,10	11,56	12,02	12,95	13,88
	1,176	1,175	1,173	1,173	1,173	1,171	1,171
	1,989	1,988	1,986	1,985	1,984	1,982	1,980
	1,94	1,94	1,93	1,93	1,93	1,92	1,91
	10,08	12,14	14,21	15,25	16,29	18,39	20,50
	12,12	13,37	14,63	15,76	15,89	17,17	18,45
	1,154	1,153	1,152	1,152	1,151	1,149	1,146
	1,995	1,993	1,992	1,990	1,989	1,987	1,985
	1,93	1,93	1,92	1,92	1,92	1,91	1,90
	13,59	16,37	19,19	20,61	22,03	24,89	27,78
	15,48	17,18	18,90	19,77	20,63	22,38	24,14
	1,132	1,131	1,129	1,128	1,127	1,125	1,123
	2,001	1,998	1,997	1,995	1,994	1,992	1,990
	1,92	1,92	1,91	1,91	1,91	1,90	1,90

t°	φ	0%	10%	20%	30%	40%
35°	d	0,00	3,55	7,13	10,76	14,43
	I	8,39	10,56	12,76	14,98	17,23
	γ	1,123	1,121	1,119	1,116	1,114
	B_0	—	2,017	2,015	2,012	2,009
	B	—	—	—	—	1,93
40°	d	0,00	4,66	9,40	14,20	19,07
	I	9,58	12,45	15,37	18,32	21,31
	γ	1,105	1,103	1,098	1,096	1,093
	B_0	—	2,025	2,022	2,018	2,015
	B	—	—	1,95	1,93	1,92
45°	d	0,00	6,07	12,27	18,58	25,03
	I	10,78	14,53	18,36	22,25	26,23
	γ	1,088	1,084	1,080	1,076	1,072
	B_0	—	2,030	2,028	2,024	2,021
	B	—	—	1,94	1,93	1,91
50°	d	0,00	7,84	15,88	24,13	32,60
	I	11,98	16,84	21,82	26,93	32,18
	γ	1,071	1,066	1,061	1,056	1,050
	B_0	—	2,035	2,033	2,030	2,027
	B	—	—	1,94	1,92	1,90
55°	d	0,00	10,05	20,43	31,15	42,24
	I	13,18	19,43	25,89	32,55	39,45
	γ	1,054	1,048	1,043	1,036	1,030
	B_0	—	2,044	2,040	2,035	2,033
	B	—	—	1,94	1,91	1,90
60°	d	0,00	12,78	26,10	39,98	54,48
	I	14,38	22,36	30,67	39,33	48,38
	γ	1,038	1,030	1,023	1,016	1,007
	B_0	—	2,053	2,046	2,040	2,038
	B	—	—	1,93	1,91	1,89
65°	d	0,00	16,14	33,15	51,08	70,02
	I	15,58	25,70	36,35	47,58	59,43
	γ	1,023	1,013	1,003	0,994	0,984
	B_0	—	2,060	2,053	2,045	2,043
	B	—	—	1,93	1,90	1,88
70°	d	0,00	20,27	41,90	65,03	89,83
	I	16,78	29,53	43,13	57,66	73,24
	γ	1,008	0,996	0,985	0,973	0,961
	B_0	—	2,068	2,059	2,050	2,047
	B	—	—	1,92	1,89	1,87
75°	d	0,00	25,30	52,74	82,60	115,21
	I	17,99	33,95	51,26	70,09	90,64
	γ	0,994	0,979	0,965	0,950	0,936
	B_0	—	2,071	2,060	2,050	2,046
	B	—	—	1,91	1,88	1,86

	50%	60%	70%	75%	80%	90%	100%
	18,14	21,90	25,70	27,62	29,54	33,43	37,37
	19,50	21,80	24,13	25,31	26,48	28,86	31,27
	1,111	1,109	1,106	1,105	1,104	1,101	1,100
	2,007	2,004	2,003	2,001	2,000	1,998	1,995
	1,92	1,91	1,90	1,90	1,89	1,89	1,88
	24,03	29,05	34,16	36,74	39,35	44,62	49,98
	24,36	27,45	30,59	32,18	33,78	37,02	40,31
	1,090	1,087	1,084	1,082	1,081	1,077	1,074
	2,013	2,010	2,008	2,006	2,005	2,003	2,000
	1,91	1,90	1,89	1,89	1,88	1,88	1,87
	31,60	38,31	45,15	48,63	52,14	59,28	66,57
	30,29	34,43	38,65	40,79	42,96	47,36	51,86
	1,069	1,064	1,061	1,058	1,056	1,052	1,048
	2,019	2,016	2,014	2,012	2,011	2,008	2,006
	1,90	1,89	1,88	1,88	1,88	1,87	1,86
	41,29	50,21	59,38	64,06	68,79	78,47	88,42
	37,56	43,08	48,76	51,66	54,59	60,58	66,74
	1,048	1,041	1,035	1,032	1,030	1,026	1,021
	2,025	2,022	2,020	2,018	2,017	2,014	2,012
	1,89	1,88	1,88	1,87	1,87	1,86	1,85
	53,70	65,57	77,86	84,18	90,60	103,80	117,50
	46,57	53,94	61,58	65,51	69,49	77,69	86,18
	1,023	1,017	1,010	1,007	1,004	0,998	0,991
	2,030	2,028	2,026	2,024	2,023	2,020	2,018
	1,89	1,88	1,87	1,86	1,86	1,85	1,84
	69,61	85,44	102,00	110,58	119,35	137,54	156,64
	57,81	67,68	78,01	83,37	88,82	100,15	112,05
	0,999	0,992	0,984	0,980	0,976	0,969	0,961
	2,035	2,033	2,031	2,030	2,029	2,026	2,024
	1,88	1,87	1,86	1,85	1,85	1,84	1,83
	89,95	111,26	133,77	145,48	157,69	183,15	210,31
	71,90	85,24	99,32	106,02	114,27	130,19	147,15
	0,976	0,965	0,956	0,951	0,945	0,937	0,927
	2,039	2,036	2,034	2,032	2,030	2,027	2,025
	1,87	1,86	1,85	1,84	1,83	1,82	1,81
	116,33	145,16	176,15	192,60	209,73	246,21	285,99
	89,88	107,98	127,43	137,76	148,49	171,37	196,30
	0,949	0,932	0,925	0,919	0,913	0,902	0,890
	2,043	2,039	2,036	2,034	2,032	2,029	2,025
	1,86	1,84	1,83	1,83	1,82	1,81	1,80
	150,96	190,31	233,85	257,40	282,25	336,37	397,29
	113,17	137,95	165,37	180,19	195,84	229,89	268,20
	0,922	0,908	0,892	0,884	0,878	0,864	0,850
	2,040	2,036	2,031	2,029	2,027	2,022	2,018
	1,84	1,83	1,81	1,81	1,80	1,79	1,78

t° \ φ	0%	10%	20%	30%	40%	
80° $i=632,7$	d	0,00	31,41	66,15	104,77	147,96
	I	19,19	39,08	61,07	85,51	112,82
	γ	0,980	0,962	0,945	0,926	0,909
	B_0	—	2,075	2,062	2,050	2,044
	B	—	—	1,90	1,87	1,85
85° $i=634,9$	d	0,00	38,84	82,83	133,07	190,95
	I	20,39	45,07	73,02	104,92	141,65
	γ	0,966	0,945	0,923	0,902	0,881
	B_0	—	2,076	2,061	2,046	2,039
	B	—	—	1,89	1,86	1,83
90° $i=637,1$	d	0,00	47,81	103,54	169,34	248,12
	I	21,59	52,09	87,61	129,53	179,69
	γ	0,974	0,927	0,902	0,877	0,851
	B_0	—	2,078	2,060	2,042	2,034
	B	—	—	1,88	1,84	1,81
95° $i=639,1$	d	0,00	58,68	129,55	216,75	326,60
	I	22,79	60,35	105,69	161,43	231,61
	γ	0,953	0,918	0,879	0,849	0,819
	B_0	—	2,073	2,053	2,035	2,026
	B	—	—	1,86	1,82	1,79

$d, I, v_0 \left(\frac{m^3}{кг \text{ абс. сук. возд.}} \right), i_{\text{вод. пар.}}$ взяты из журнала „Известия тепло

	50%	60%	70%	75%	80%	90%	100%
	196,55	251,62	314,53	349,10	387,06	471,60	571,34
	143,54	178,35	218,09	239,32	263,90	317,27	380,22
	0,892	0,874	0,857	0,849	0,841	0,824	0,806
	2,038	2,033	2,027	2,024	2,021	2,016	2,010
	1,83	1,81	1,80	1,79	1,78	1,77	1,76
	258,35	337,78	432,75	487,50	548,25	691,72	874,65
	184,40	234,77	294,96	329,65	368,15	459,03	574,83
	0,860	0,840	0,818	0,807	0,798	0,778	0,757
	2,032	2,025	2,019	2,015	2,010	2,005	1,998
	1,81	1,79	1,77	1,77	1,76	1,75	1,73
	344,13	463,62	616,33	709,00	818,24	1097,51	1508,85
	240,80	316,82	413,93	473,06	542,29	719,78	981,06
	0,827	0,801	0,776	0,764	0,752	0,728	0,704
	2,026	2,018	2,010	2,006	2,001	1,994	1,986
	1,79	1,77	1,75	1,74	1,74	1,72	1,71
	469,12	661,27	934,27	1123,50	1352,19	2071,68	3601,74
	322,62	445,27	619,45	735,00	886,03	1344,84	2320,34
	0,790	0,760	0,731	0,716	0,702	0,673	0,644
	2,018	2,009	2,002	1,996	1,991	1,983	1,974
	1,77	1,75	1,73	1,72	1,71	1,70	1,68

технического института“, № 1, 1927.

Как известно, чем выше температура сушки, тем меньше требуется свежего воздуха на сушку; в то же время, чем выше температура, чем больше производительность трубы, — тем устойчивее ее работа. Наоборот, при низких температурах сушки расход воздуха на сушку увеличивается, и производительность трубы уменьшается, т. е. для работы трубы наступают весьма тяжелые условия. Поэтому *отводящую трубу надлежит рассчитывать на работу камеры при низких температурах сушки, тогда как отопительную систему — на работу при высоких температурах.* Эти обстоятельства весьма наглядно уясняются из характеристики типовой камеры (фиг. 6, стр. 122).

На одном из заводов столкнулись с необходимостью сушить дубовые косяки при очень низких температурах. На фиг. 15 дан график режима сушки, предложенный инж. Хухрянским (см. журнал „Лесопиление и деревообработка“, № 10, 1933).

Как видно из графика, в течение первых десяти суток температура в сушиле поднималась с 15 до 25°. Вполне понятно, что летом, когда температура наружного воздуха примерно та же,

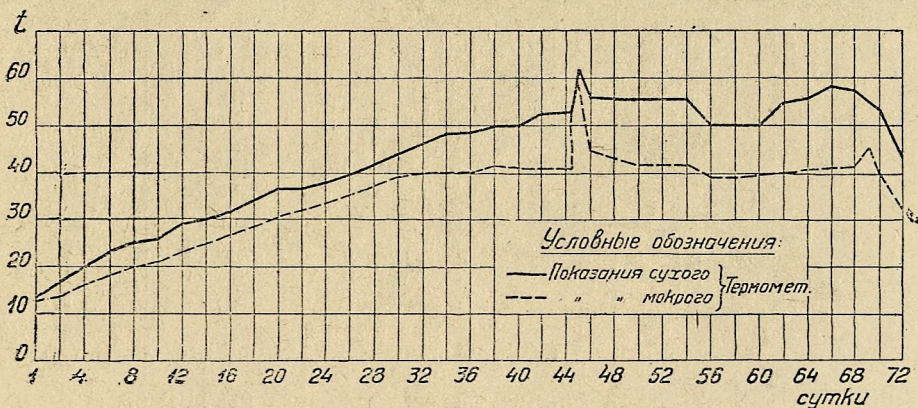
что и требуемая по режиму, рассчитывать на смену воздуха с помощью отводящей трубы не приходится. Если не сделать в камере при сушке по такому режиму принудительной смены воздуха, то всякая смена воздуха прекратится, снизить влажность в камере до нужного предела не удастся, и сушка затормозится.

Так как камеры были построены, то выход из положения был найден в устройстве эжекторов в отводящих трубах для создания в них разрежения. Расчет эжектора для этого случая дан в качестве примера в „Справочнике конструктора печей“ (стр. 99—101).

Выше было указано, что процесс циркуляции воздуха в сушиле протекает практически независимо от процесса смены воздуха. Поэтому в таком сушиле с принудительной сменой воздуха циркуляция остается естественной и проходит по вышеизложенным законам.

Очень часто приходится наблюдать на практике, что сушка происходит при закрытомшибере отводящей трубы. В этом случае сушка идет за счет воздуха, попадающего в камеру, глав-

ным образом через неплотности дверей; кроме того имеет место непосредственная диффузия водяных паров через *ограждения* сушила, что уменьшает необходимость в смене воздуха в камере.



Фиг. 15. График режима сушки дубовых косяков.

Особенно большое значение имеют неплотности дверей. В этом легко убедиться, подсчитав проходное сечение щелей, взяв, например, средний размер щели между дверью и колодой 2—5 мм. Полученные цифры будут вполне сравнимыми с размерами отводящего канала и трубы.

Коридор, куда выходят приточные каналы, желательно снабжать приточной, нагнетательной вентиляцией; ни в коем случае не должен соединяться с помещением, где установлена вытяжная вентиляция.

Н. А. АНДРОНОВА, Т. П. ДАГАЕВ, А. А. ЧИЖЕВ

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАМЕР

ЗАДАНИЕ

Сушила периодического действия предназначены для сушки дерева мягких и твердых пород. Изделия толщиной 25 мм и выше сушатся в виде досок, брусков или полуфабрикатов другой формы, которая в каждом отдельном случае диктуется технологией производства. Начальная влажность дерева, поступающего в сушило, может иметь любые значения, вплоть до влажности древесины свежесрубленного или сплавного леса. Конечная влажность дерева определяется в каждом отдельном случае технологическими требованиями производства.

Режимы и сроки сушки материала выбраны в соответствии с данными Медиссоновской лаборатории, где каждому роду материалов, в зависимости от породы, толщины и влажности, соответствует определенный режим сушки.

Все это определяет следующие области применения типовых сушил для дерева периодического действия:

- 1) строительная промышленность;
- 2) лесная промышленность;
- 3) вагоностроительная промышленность;
- 4) сельскохозяйственное машиностроение;
- 5) судостроение;
- 6) авиастроение;
- 7) автотракторная промышленность;
- 8) сушка модельного материала машиностроительных и металлургических заводов.

ОБРАБОТКА ЗАДАНИЯ

Материал загружается в камеру на подвижных платформах в штабелях. Габариты каждого штабеля: длина 6,4 м, ширина 1,5 м и высота 2,5 м. (См. прод. текста стр. 88).

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Приведенный удельный вес дерева γ_0	кг/м ³	430	610
Количество влаги, заключенное в 1 м ³ древесины, до сушки $\gamma_0 \cdot \frac{W_{\text{нач.}}}{100}$	кг/м ³	$430 \cdot \frac{65}{100} = 280$	$610 \cdot \frac{50}{100} = 305$
Удельный вес влажного дерева до сушки $\gamma_1 = \gamma_0 \cdot 1 + \left(\frac{W_{\text{нач.}}}{100}\right)$	кг/м ³	$430 \cdot \left(1 + \frac{65}{100}\right) = 710$	$610 \cdot \left(1 + \frac{50}{100}\right) = 915$
Количество влаги, заключенное в 1 м ³ древесины, после сушки $\gamma_0 \cdot \frac{W_{\text{нач.}}}{100}$	кг/м ³	$430 \cdot \frac{10}{100} = 43$	$610 \cdot \frac{10}{100} = 61$
Количество влаги, испаряемой из древесины	кг/м ³	$280 - 43 = 237$	$305 - 61 = 244$
Действительная загрузка камер	м ³	Досками 25-мм 8,5	Досками 38-мм 10
Длительность сушки	Сутки	3	45
Количество влаги W , испаряемой из камеры (мощность камеры)	кг/час	$\frac{237 \cdot 8,5}{3 \cdot 24} = 28$	$\frac{244 \cdot 10}{45 \cdot 24} = 2,25$
Мощность 1 пог. м камеры	кг/час	4	0,32
Режим сушки		000	8
Состояние воздуха в начале сушки при входе в материал t'_1 и φ'_1	°C	80	40
	%	85	85

	Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
	для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
	430	610	430	610
	$430 \cdot \frac{65}{100} = 280$	$610 \cdot \frac{50}{100} = 305$	280	305
	$430 \cdot \left(1 + \frac{65}{100}\right) = 710$	$610 \cdot \left(1 + \frac{50}{100}\right) = 915$	710	915
	$430 \cdot \frac{10}{100} = 43$	$610 \cdot \frac{10}{100} = 61$	43	61
	$280 - 43 = 237$	$305 - 61 = 244$	237	244
	Досками 25-мм 17	Досками 38-мм 20	Досками 25-мм 34	Досками 38-мм 40
	3	45	3	45
	$\frac{237 \cdot 17}{3 \cdot 24} = 56$	$\frac{244 \cdot 20}{45 \cdot 24} = 4,5$	$\frac{237 \cdot 34}{3 \cdot 24} = 112$	$\frac{244 \cdot 40}{45 \cdot 24} = 9$
	4	0,32	8	0,64
	000	8	000	8
	80	40	80	40
	85	85	85	85

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Состояние воздуха в конце сушки при входе в материал t''_1 и φ''_1	°С	90	60
	%	30	35
Состояние атмосферного воздуха для тепловых расчетов t_0 и φ_0	°С	15	15
	%	75	75
Состояние атмосферного воздуха при расчете трубы	°С	25	25
	%	60	60

Примечание. Для тепловых расчетов за состояние атмосферного воздуха при расчете трубы состояние атмосферного воздуха принято из расчета самых небла

По ширине штабеля даны вертикальные прозоры для свободного движения нисходящего потока воздуха около материала. Ширина штабеля, занятого древесиной, 1,1 м.

По высоте штабеля между досками кладутся прокладки, назначение которых — увеличить поверхность испарения материала.

Табл. 1 дает толщину прокладок и емкость каждого штабеля, в зависимости от толщины материала.

Таблица 1

Толщина досок мм	Толщина прокладок мм	Емкость штабеля м ³
25	25	8,5
50	40	10,0
75	40	11,5

Сушильные камеры проектируются емкостью в 1, 2 и 4 штабеля. Соответственно камеры условно обозначаются емкостью 10, 20 и 40 м³.

В расчете начальная влажность материала $W_{нач.}$ принята для мягких пород 65% и для твердых пород 50%. Конечная влажность материала $W_{кон.} = 10\%$ (влажность материала абсолютная).

Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
90	60	90	60
30	35	30	35
15	15	15	15
75	75	75	75
25	25	25	25
60	60	60	60

духа принят воздух, поступающий из коридора управления камерами. При благоприятных условиях работы трубы в летнее время.

Расчеты ведутся параллельно для камер емкостью 10, 20 и 40 м³ в случае загрузки сосновыми досками (мягкие породы) толщиной 25 мм и дубовыми досками (твердые породы) толщиной 38 мм.

Помимо расчетных величин даются таблицы с характерными цифрами задания для случаев загрузки другими материалами, а также составлены характеристические кривые камер.

Таким образом оформленный расчет принимает развернутый вид и позволяет определять технические возможности сушильной камеры в широких пределах, значительно отступающих от первоначального задания.

Описания характеристик и примеры их пользования будут разобраны ниже.

РАСЧЕТ ЦИРКУЛЯЦИИ

Помимо перечисленных условий для дальнейших расчетов мы должны выбрать такую систему сушил, которая при наибольшей экономичности и простоте конструкции давала бы возможность осуществить заданный режим сушки. Кроме того система сушил должна обеспечить такую кратность циркуляции у материала, чтобы осуществились допускаемые для данного материала перепады температур или перепады влажности и получить необходимые для сушки дерева скорости воздуха от 0,05 до 0,5 м/сек.

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Режимные условия при расчете циркуляции t и φ	°С	85	45
	%	50	65
Значение B при заданных условиях, считая температуру материала равной температуре мокрого термометра-психрометра	—	1,81	1,89
Фактор режима $R = W \cdot B$	—	$28 \cdot 1,81 = 50,75$	$2,25 \cdot 1,89 = 4,25$
Коэффициент C	—	0,5	0,5
Напорная высота H	м	3,6	3,6
Горизонтальное сечение f_1 между досками	м ²	$(1,5-1,1) 6,4 = 2,6$	2,6
Потеря напора ζ_1 от сужения и расширения струи по опытам проф. Кирпичева	—	5	5
Потери ζ_2 при завороте струи под прямым углом	—	1,5	1,5
Вертикальное сечение f_2 под материалом	м ²	$1,25 \cdot 6,4 \cdot 2 = 16$	16
Горизонтальное сечение f_3 между штабелями для восходящих токов воздуха	м ²	$0,45 \cdot 6,4 \cdot 2 = 5,76$	5,76
Вертикальное сечение над материалами f_4	м ²	$0,6 \cdot 6,4 \cdot 2 = 7,68$	7,68

Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
85	45	85	45
50	65	50	65
1,81	1,89	1,81	1,89
$56 \cdot 1,81 = 101,5$	$4,5 \cdot 1,89 = 8,5$	$112 \cdot 1,81 = 206$	$9,0 \cdot 1,89 = 17,0$
0,5	0,5	0,5	0,5
3,6	3,6	3,6	3,6
$(1,5-1,1) 6,4 \cdot 2 = 5,2$	5,2	$(1,5-1,1) 6,4 \cdot 2 = 10,4$	10,4
5	5	5	5
1,5	1,5	1,5	1,5
$1,25 \cdot 6,4 \cdot 2 \cdot 2 = 32$	32	$1,25 \cdot 6,4 \cdot 2 \cdot 4 = 64$	64
$0,45 \cdot 6,4 \cdot 2 \cdot 2 = 11,52$	11,52	$(0,45 \cdot 2 + 0,8) 6,4 \cdot 2 = 21,8$	21,8
$0,6 \cdot 6,4 \cdot 2 \cdot 2 = 15,35$	15,35	$0,6 \cdot 6,4 \cdot 2 \cdot 4 = 30,7$	30,7

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³		Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
Сумма сопротивлений $\sum \frac{\zeta}{f^2}$		$\frac{5}{2,6^2} + \frac{1,5}{16^2} + \frac{1,5}{5,76^2} + \frac{1,5}{7,68^2} = 0,813$	$\frac{5}{2,6^2} + \frac{1,5}{16^2} + \frac{1,5}{5,76^2} + \frac{1,5}{7,68^2} = 0,813$	$\frac{5}{5,2^2} + \frac{1,5}{32^2} + \frac{1,5}{11,52^2} + \frac{1,5}{15,35^2} = 0,204$	0,204	$\frac{5}{10,4^2} + \frac{1,5}{64^2} + \frac{1,5}{21,8^2} + \frac{1,5}{30,7^2} = 0,051$	0,051
Конструктивный фактор $K = \frac{CH}{\sum \frac{\zeta}{f^2}}$	—	$\frac{3,6 \cdot 0,5}{0,813} = 2,21$	2,21	$\frac{3,6 \cdot 0,5}{0,204} = 8,82$	8,82	$\frac{3,6 \cdot 0,5}{0,051} = 35,4$	35,4
Перепад температур между верхом и низом $\Delta t = 0,00389 (273 + t) \sqrt[3]{\frac{R^2}{K}}$	°C	$0,00389 (273 + 85) \cdot \sqrt[3]{\frac{50,75^2}{2,21}} = 14,6$	$0,00389 (273 + 45) \cdot \sqrt[3]{\frac{4,25^2}{2,21}} = 2,5$	$0,00389 (273 + 85) \cdot \sqrt[3]{\frac{101,5^2}{8,82}} = 14,6$	$0,00389 (273 + 45) \cdot \sqrt[3]{\frac{8,5^2}{8,82}} = 2,5$	$1,39 \sqrt[3]{\frac{206^2}{35,4}} = 14,8$	$1,24 \sqrt[3]{\frac{17^2}{35,4}} = 2,5$
Объем воздуха, циркулирующего у материала $V = 0,262 \sqrt[3]{R \cdot K}$	м ³ /сек	$0,262 \sqrt[3]{50,75 \cdot 2,21} = 1,25$	$0,262 \sqrt[3]{4,25 \cdot 2,21} = 0,55$	$0,262 \sqrt[3]{101,5 \cdot 8,82} = 2,5$	$0,262 \sqrt[3]{8,5 \cdot 8,82} = 1,1$	$0,262 \sqrt[3]{206 \cdot 35,4} = 5,1$	$0,262 \sqrt[3]{17 \cdot 35,4} = 2,2$
	м ³ /час	$1,25 \cdot 3600 = 4500$	$0,55 \cdot 3600 = 1980$	$2,5 \cdot 3600 = 9000$	$1,1 \cdot 3600 = 3960$	$5,1 \cdot 3600 = 18400$	$2,2 \cdot 3600 = 7900$
Скорость воздуха у материала $v = \frac{V}{f}$	м/сек	$\frac{1,25}{2,6} = 0,48$	$\frac{0,55}{2,6} = 0,211$	$\frac{2,5}{5,2} = 0,48$	$\frac{1,1}{5,2} = 0,211$	$\frac{5,1}{10,4} = 0,49$	$\frac{2,2}{10,4} = 0,211$
Температура воздуха под материалом t_2	°C	$85 - 14,6 = 70,4$	$45 - 2,5 = 42,5$	$85 - 14,6 = 70,4$	$45 - 2,5 = 42,5$	$85 - 14,8 = 70,2$	$45 - 2,5 = 42,5$
Относительная влажность воздуха под материалом по диаграмме I—d	%	93	75	93	75	93	75
Кратность естественной циркуляции $n = \frac{d_1 - d_0}{d_2 - d_1}$	—	$\frac{268 - 8,11}{268 - 258,35} = 27,0$	$\frac{42,6 - 8,11}{42,6 - 41,7} = 38,4$	27,0	38,4	27,0	38,4

Наиболее простой схемой сушилки для дерева являются сушилки системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло, в которых благодаря организованному подводу и отводу воздуха и правильному расположению нагревательных приборов осуществляется естественная многократная циркуляция. Расчет циркуляции покажет, получим ли мы в условиях этой системы необходимую равномерность сушки.

Ниже приводится расчет естественной циркуляции в типовых камерах системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло.

Расчет естественной циркуляции составлен на среднюю интенсивность испарения. Точки состояния воздуха в первый период сушки по медиссоновским режимам располагаются на $I-d$ -диаграмме очень близко к кривой 100-процентного насыщения, вследствие чего малейшие перепады температур вызываю конденсацию паров воды. Помимо этого явление усложняется наличием в первом периоде явлений прогрета материала и пропарки, что не позволяет произвести расчет циркуляции применительно к этому отрезку времени, поэтому при расчете циркуляции взято следующее состояние воздуха: для мягких пород $t = 85^\circ$ и $\varphi = 50\%$, для твердых пород $t = 45^\circ$ и $\varphi = 65\%$.

Расчет естественной циркуляции произведен на основании статьи Г. П. Иванцова „Расчет естественной циркуляции в сушилах многократного насыщения“.

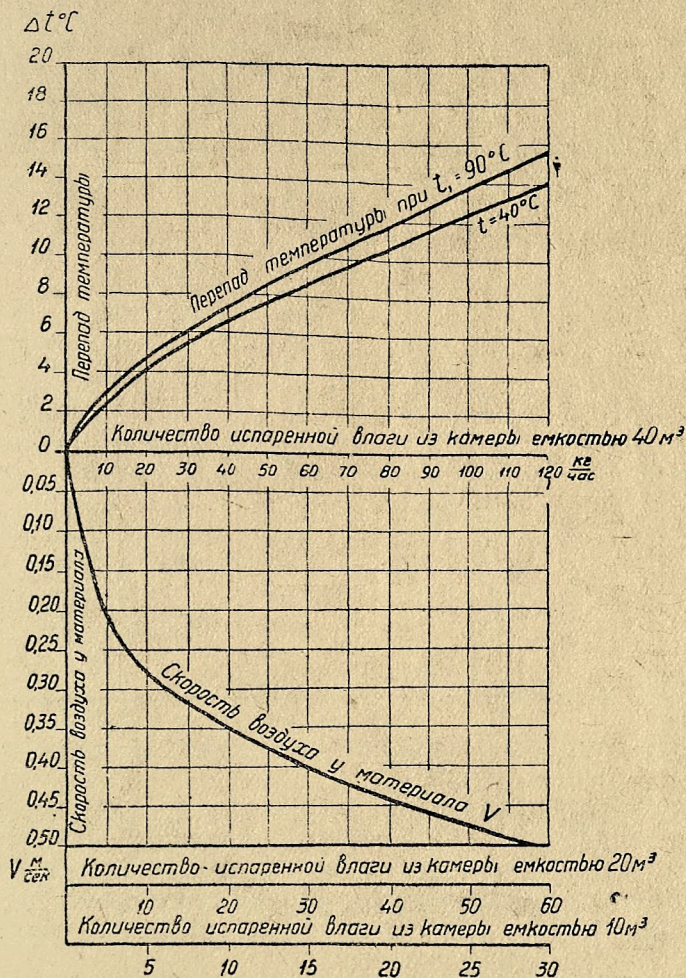
Обозначения всех встречающихся при расчете циркуляции величин приведены в указанной статье. Основные величины параметров влажного воздуха при дальнейших расчетах взяты по $I-d$ -таблицам, приведенным в конце статьи инж. Г. П. Иванцова, или непосредственно по $I-d$ -диаграмме (см. табл. стр. 90).

Перепад температур в камере зависит от двух факторов (см. „Расчет естественной циркуляции в сушилах многократного насыщения“): 1) от конструктивного фактора K , который для данной конструкции является величиной постоянной, и 2) от фактора режима R , который изменяется с изменением температуры и влажности воздуха (t и φ) в малой степени и от количества испаренной влаги W —в большей степени.

Приведенный выше расчет определяет перепад температур Δt и перепад относительной влажности $\Delta \varphi$ воздуха лишь для нескольких частных случаев. В действительности приходится иметь дело с изменениями значений W в весьма широких пределах, поэтому расчет естественной циркуляции представлен графически (фиг. 1).

На этом графике по оси абсцисс отложены значения W —количество влаги, удаляемой из камеры емкостью 40 м³, по основной осью абсцисс отложены значения W для камер емкостью 20 и 10 м³; по оси ординат вверх отложены значения Δt —перепада температур воздуха между верхом и низом штабеля; по оси ординат вниз отложены значения скорости воздуха у материала v . На графике даны кривые скорости воздуха в процессе многократной естественной циркуляции у материала.

На графике даны кривые перепада температур при $t = 40^\circ$ и $t_1 = 90^\circ$, которые почти совпадают друг с другом. Относительная влажность воздуха при построении графика являлась величиной постоянной ($\varphi_1 = 50\%$), так как при изменении последней Δt изменяется в еще меньшей степени, чем при изменении температуры.



Фиг. 1.

Пример пользования графиком:

Дано: $W = 80,0 \text{ кг/час}$, $t_1 = 65^\circ$; по графику определяем перепад температур $\Delta t = 12^\circ$ и скорость воздуха у материала $v = 0,44 \text{ м/сек}$.

Работа камер для сушки дерева системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло показывает, что практически перепады температур осуществляются гораздо меньшие, что объясняется, вероятно,

W и режим, принятый в расчете циркуляции
 W —количество испаренной влаги (кг/час.)

Режим $\left\{ \begin{array}{l} t — \text{температура воздуха в камере } (^\circ\text{C}) \\ \varphi — \text{относительная влажность воздуха в камере } (\%) \end{array} \right.$

Порода дерева	Толщина	Срок сушки суток	W кг/час	Режим	
				$^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$
Сосна	1	3	112	85	50
”	2	6	65	75	50
”	3	9	50,5	65	50
Тополь, липа, орех	1/2	2	104	70	50
” ” ”	1	8	25,5	65	50
” ” ”	2	16	15,0	60	60
” ” ”	3	24	11,5	55	70
Береза, ольха	1/2	4	59,5	70	50
” ”	1	15	15,8	65	50
” ”	2	30	9,35	60	60
” ”	3	45	7,18	55	70
Бук, клен	1/2	4	69,0	65	50
” ”	1	16	17,2	60	50
” ”	2	32	10,4	55	60
” ”	3	48	8,0	60	70
Дуб	1/2	8	43,4	50	50
”	1	30	11,5	45	50
”	2	60	6,8	40	60
”	3	90	5,2	35	70

изменением коэффициента напорной высоты C , значения которого меняются в процессе сушки.

Графики, характеризующие циркуляцию, показывают, что полученные перепады температур, перепады относительных влажностей воздуха и скорости его у материала, в условиях естественной циркуляции воздуха, вполне приемлемы для сушки дерева толщиной для мягких пород от 25 мм и выше и для твердых пород — от 12,5 мм и выше.

На уменьшение перепада температур влияет также инжекция струй приточного воздуха, которая в расчете не учтена.

Расчетом естественной циркуляции определены основные геометрические размеры сушильных камер, что позволяет произвести расчет отдачи тепла ограждениями и далее приступить к тепловому расчету.

РАСЧЕТ ПОТЕРИ ТЕПЛА ОГРАЖДЕНИЯМИ

Расчет ведем на случай ограждения пустотелыми черепичными камнями.

Расчет теплопроводности пустотелых камней

У Власова („Известия Теплотехнического института“, № 5, 1928, стр. 61) приведены данные исследования с помощью электрической модели теплопроводности камня такого сечения (фиг. 2).

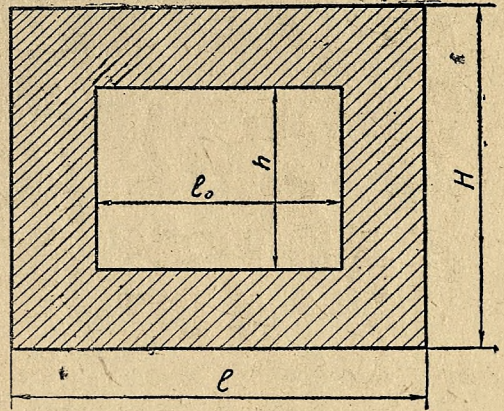
В данном случае можно условно считать, что $l_0 = h = 60$ мм, $l = 125$ мм и $H = 120$ мм; тогда $h:H = 0,5$ и $l_0:l = 0,48$.

Для этих условий введение пустот понижает теплопроводность стены по опытам Власова до 58% от первоначальной. Принимая во внимание теплообмен внутри пустоты, получим значение теплопроводности порядка 60—70%. Расчет можно вести по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{0,7} \cdot \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

где δ — полная толщина стены и

λ — коэффициент теплопроводности материала, из которого сделаны камни.



Фиг. 2.

Коэффициент теплопередачи

1. Стены из пустотелого черепичного камня толщиной 510 мм:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{0,7} \cdot \frac{0,51}{0,7} + \frac{1}{8}} = \frac{1}{1,29} = 0,78 \text{ Кал/м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}$$

2. Стена из пустотелого черепичного камня толщиной 380 мм:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{0,7} \cdot \frac{0,38}{0,7} + \frac{1}{8}} = \frac{1}{1,02} = 0,98 \text{ Кал/м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}$$

3. Фундамент из бутобетона толщиной 510 мм, с облицовкой пустотелыми черепичными камнями:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,51}{0,66 \cdot 1,5} + \frac{1}{0,7} \cdot \frac{0,12}{0,7} + \frac{1}{8}} = 1,0 \text{ Кал/м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}$$

4. Двери, изолированные смесью асбеста с магнезией; удельный вес смеси 0,35:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,035}{0,055} + \frac{1}{8}} = \frac{1}{0,89} = 1,12 \text{ Кал/м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}$$

5. При подсчете коэффициента теплопередачи перекрытия определим отдельно значение ($\delta:\lambda$) перекрытия из пустотелых черепичных камней (см. чертеж № 21217):

а) при потоке тепла через материал с пустотами:

$$\frac{\lambda}{\delta} = \frac{1}{\frac{0,045}{0,7} + 2 \cdot 0,19 + \frac{0,05}{1,0}} = \frac{1}{0,5} = 2,0$$

б) при потоке тепла через сплошной материал:

$$\frac{\lambda_1}{\delta_1} = \frac{0,85}{0,2} = 4,25$$

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1} = 2,0 \cdot 0,56 + 4,25 \cdot 0,44 = 1,12 + 1,87 = 2,99$$

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{1}{2,99} = 0,34$$

Определяем коэффициент теплопередачи перекрытия, составленного из следующих материалов:

1) пустотелые черепичные камни с железобетонным перекрытием:

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1} = 0,34$$

2) инфузорная земля: $\frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0,24}{0,12 \cdot 1,5} = 1,33$

3) железобетонная плита: $\frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{0,02}{0,66 \cdot 1,5} = 0,02$

4) песок: $\frac{\delta_4}{\lambda_4} = \frac{0,04}{0,98 \cdot 1,5} = 0,03$

5) доски: $\frac{\delta_5}{\lambda_5} = \frac{0,025}{0,14 \cdot 1,5} = 0,12$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{8} + 1,33 + 0,02 + 0,03 + 0,12 + \frac{1}{8}} = \frac{1}{1,75} \approx 0,57 \text{ Кал/м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}$$

Потеря тепла в окружающую среду камерой емкостью в 10 м^3

* 7

Наименование поверхности	Площадь поверхности м^2	Темпера- тура снаружи ограждения $^{\circ}\text{C}$	Толщина стен м	Потеря тепла Кал/час	
				K	со всей по- верхности
Наружная стена, гра- ничающая с улицей	$\frac{(7 + 0,51 + 2,4 + 0,51 + 0,38)}{2} \times 3,4 - 5,4 = 29,9$	- 30	0,51	0,78	$23,3(t + 30)$
Наружная стена, гра- ничающая с помещением	$(2,4 + \frac{0,51 + 0,38}{2}) 3,4 = 9,7$	+ 15	0,51	0,78	$7,5(t - 15)$
Фундаменты, гранича- щие с улицей	$(7 + \frac{0,64 + 0,51}{2} + 2,4 + \frac{0,64 + 0,38}{2}) \cdot 1 = 10,49$	- 30	0,64	1,0	$10,5(t + 30)$
Фундаменты, гранича- щие с помещением	$(2,4 + \frac{0,64 + 0,38}{2}) \cdot 1 = 2,91$	+ 15	0,51	0,78	$2,3(t - 15)$
Перекрытие	$(7 + 0,51) 2,4 + \frac{0,51 + 0,38}{2} = 21,4$	- 30	—	0,57	$12,2(t + 30)$
Дверь	$3 \cdot 1,8 = 5,4$	- 30	—	1,12	$6,1(t + 30)$

Полная отдача тепла ограждениями камеры емкостью 10 м^3

$$(23,3 + 10,5 + 12,2 + 6,1)(t + 30) + (7,5 + 2,3)(t - 15) = 52,1 t + 1563 + 9,8 t - 147 = 1416 + 61,9 t \text{ Кал/час}$$

Потеря тепла в окружающую среду камерой емкостью в 20 м³

Наименование поверхности	Площадь поверхности, м ²	Темпера- тура снаружи ограждения °С	Толщина стен м	Потеря тепла Кал/час	
				К	со всей по- верхности
Наружная стена, гра- ничающая с улицей	$\left(14 + 0,51 + 2,4 + \frac{0,51 + 0,38}{2}\right) 3,4 - 5,4 = 53,6$	- 30	0,51	0,78	42,0 (t + 30)
Наружная стена, гра- ничающая с помещением	$\left(2,4 + \frac{0,51 + 0,38}{2}\right) 3,4 = 9,7$	+ 15	0,51	0,78	7,5 (t - 15)
Фундаменты, гранича- щие с улицей	$\left(14 + \frac{0,64 + 0,51}{2} + 2,4 + \frac{0,64 + 0,38}{2}\right) \cdot 1 = 17,49$	- 30	0,64	1,0	17,5 (t + 30)
Фундаменты, гранича- щие с помещением	$\left(2,4 + \frac{0,64 + 0,38}{2}\right) \cdot 1 = 2,91$	+ 15	0,51	0,78	2,3 (t - 15)
Перекрытие	$(14 + 0,51) 2,4 + \frac{0,51 + 0,38}{2} = 41,4$	- 30	—	0,57	23,6 (t + 30)
Дверь	3 · 1,8 = 5,4	- 30	—	1,12	6,1 (t + 30)

Полная отдача тепла ограждениями камеры емкостью 20 м³

$$(42,0 + 17,5 + 23,6 + 6,1) (t + 30) + (7,5 + 2,3) (t - 15) = 89,2 t + 2676 + 9,8 t - 147,0 = 2529 + 99,0 t \text{ Кал/час}$$

Потеря тепла в окружающую среду камерой емкостью 40 м³

Наименование поверхности	Площадь поверхности м ²	Темпера- тура снаружи ограждения °С	Толщина стен м	Потеря тепла Кал/час	
				К	со всей по- верхности
Наружная стена, гра- ничающая с улицей	$\left(14 + 0,51 + 4,7 + \frac{0,51 + 0,38}{2}\right) 3,4 - 10,8 = 56,0$	- 30	0,51	0,78	43,5 (t + 30)
Наружная стена, гра- ничающая с помещением	$\left(4,7 + \frac{0,51 + 0,38}{2}\right) 3,4 = 17,5$	+ 15	0,51	0,78	13,7 (t - 15)
Фундаменты, гранича- щие с помещением	$\left(4,7 + \frac{0,64 + 0,38}{2}\right) 1 = 5,21$	+ 15	0,51	0,78	4,1 (t - 15)
Фундаменты, гранича- щие с улицей	$\left(14 + \frac{0,64 + 0,51}{2} + 4,7 + \frac{0,64 + 0,38}{2}\right) \cdot 1 = 19,79$	- 30	0,64	1,00	19,8 (t + 30)
Перекрытие	$(14 + 0,51) \left(4,7 + \frac{0,51 + 0,38}{2}\right) = 75,0$	- 30	—	0,57	42,7 (t + 30)
Дверь	3 · 1,8 · 2 = 10,8	- 30	—	1,12	12 (t + 30)

Полная отдача тепла ограждениями камеры емкостью 40 м³

$$(43,5 + 19,8 + 42,7 + 12) (t + 30) + (13,7 + 4,1) (t - 15) = 118,0 t + 3540 + 17,8 t - 267 = 3273 + 135,8 t \text{ Кал/час}$$

Тепловой

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Температура и относительная влажность отходящего воздуха при выbranном режиме	°C	70,4	42,5
		93	75
	%	75	58
		60	40
Приращение влагосодержания воздуха в начале сушки на 1 кг воздуха $\Delta i' = d'_2 - d_0$	г	268,0 — 8,11 = 259,89	42,6 — 8,11 = 34,49
		Приращение теплосодержания воздуха в начале сушки на 1 кг воздуха $\Delta i = i_2 - i_0$	Кал
Расход воздуха на 1 кг испаряемой влаги в начале сушки $v' = \frac{1000}{\Delta d'}$	кг	$\frac{1000}{259,89} = 3,85$	
		Расход тепла на сушку 1 кг испаряемой влаги $q' = 1000 \frac{\Delta i}{\Delta d}$	Кал
Приращение влагосодержания в конце сушки на 1 кг воздуха $\Delta d'' = d''_2 - d_0$	г		

расчет

Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
70,4 93	42,5 75	70,2 93	42,5 75
75 60	58 40	75 60	58 40
259,89	34,49	259,89	34,49
176,51	28,51	176,51	28,51
3,85	29,0	3,85	29,0
680	830	680	830
182,2	41,48	182,2	41,48

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Приращение теплосодержания в конце сушки на 1 кг воздуха $\Delta i'' = i_2'' - i_0$	Кал	137,95 - 8,49 = 129,46	44,8 - 8,49 = 36,31
Расход тепла на сушку 1 кг испаряемой влаги в конце сушки $q'' = 1000 \frac{\Delta i''}{\Delta d''}$	Кал	$1000 \cdot \frac{129,46}{182,2} = 710$	$1000 \cdot \frac{36,31}{41,48} = 875$
Расход воздуха на 1 кг испаряемой влаги в конце сушки $v'' = \frac{1000}{\Delta d''}$	кг	$\frac{1000}{182,2} = 5,5$	$\frac{1000}{41,48} = 24,1$
Расход тепла на сушку и нагрев воздуха до t'' в начале сушки	Кал/час	680 · 28 = 19040	830 · 2,25 = 1870
То же в конце сушки	Кал/час	710 · 28 = 19880	875 · 2,25 = 1970
Потеря тепла ограждениями в начале сушки	Кал/час	1416 + 61,9 · 80 = 6370	1416 + 61,9 · 40 = 3890
То же в конце сушки	Кал/час	1416 + 61,9 · 90 = 6990	1416 + 61,9 · 60 = 5130
Расход тепла на прогрев материала от 0° до t''_1 , считая теплоемкость дерева при 10% влажности $c = 0,45$ Кал/кг	Кал	$430 \left(1 + \frac{10}{100}\right) \times 8,5 \cdot 0,45 \cdot 90 = 19200 \cdot 8,5 = 163000$	$610 \cdot 1,1 \cdot 10 \cdot 0,45 \cdot 60 = 18100 \cdot 10 = 181000$

	Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
	для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
	129,46	36,31	129,46	36,31
	710	875	710	875
	5,5	24,1	5,5	24,1
	680 · 56 = 38080	830 · 4,5 = 3740	680 · 112 = 76160	830 · 9,0 = 7480
	710 · 56 = 39760	875 · 4,5 = 3940	710 · 112 = 79520	875 · 9,0 = 7880
	$2529 + 99,0 \cdot 80 = 10450$	$2529 + 99,0 \cdot 40 = 6490$	$3273 + 135,8 \cdot 80 = 14140$	$3273 + 135,8 \cdot 40 = 8710$
	$2529 + 99,0 \cdot 80 = 11440$	$2529 + 99,0 \cdot 60 = 8470$	$3273 + 135,8 \cdot 90 = 15500$	$3273 + 135,8 \cdot 60 = 11420$
	$430 \left(1 + \frac{10}{100}\right) \times 17 \cdot 0,45 \cdot 90 = 19200 \cdot 17 = 326000$	$610 \cdot 1,1 \cdot 20 \cdot 0,45 \cdot 60 = 18100 \cdot 20 = 362000$	19200 · 34 = 652000	18100 · 40 = 724000

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³		Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
Среднечасовой расход тепла на подогрев материала	Кал	$\frac{163\,000}{3 \cdot 24} = 2268$	$\frac{181\,000}{45 \cdot 24} = 170$	$\frac{326\,000}{3 \cdot 24} = 4525$	$\frac{362\,000}{45 \cdot 24} = 340$	$\frac{652\,000}{3 \cdot 24} = 9050$	$\frac{724\,000}{45 \cdot 24} = 670$
Расход тепла на прогрев железных вагонок $c_{ж.ел} = 0,11$ Кал/кг	Кал	$150 \cdot 2 \cdot 0,11 \cdot 90 = 2970$	$150 \cdot 2 \cdot 0,11 \cdot 60 = 1980$	$150 \cdot 4 \cdot 0,11 \cdot 90 = 5940$	$150 \cdot 4 \cdot 0,11 \cdot 60 = 3960$	$150 \cdot 8 \cdot 0,11 \cdot 90 = 11\,880$	$150 \cdot 8 \cdot 0,11 \cdot 60 = 7920$
Среднечасовой прогрев вагонок	Кал	$\frac{2970}{24 \cdot 3} = 42$	Пренебрегаем	$\frac{5940}{24 \cdot 3} = 85$	Пренебрегаем	$\frac{11\,880}{24 \cdot 3} = 170$	Пренебрегаем
Общий расход тепла в начале сушки	Кал/час	$19\,040 + 6370 + 2268 + 42 = 27\,720$	$1870 + 3890 + 170 = 5930$	$38\,080 + 10\,450 + 4525 + 85 = 53\,140$	$3740 + 6490 + 340 = 10\,570$	$76\,160 + 14\,140 + 9050 + 170 = 99\,520$	$7480 + 8710 + 670 = 16\,860$
Общий расход тепла в конце сушки	Кал/час	$19\,880 + 6370 + 2268 + 42 = 28\,560$	$1970 + 5130 + 170 = 7270$	$39\,760 + 11\,440 + 4525 + 85 = 55\,810$	$3940 + 8470 + 340 = 12\,750$	$79\,520 + 15\,500 + 9050 + 165 = 104\,240$	$7880 + 11\,420 + 670 = 19\,970$
Теплоотдача ребристых труб по данным Ритчеля (см. фиг. 3) при $p = 3$ атм в начале сушки	Кал/м ²	$\Delta t = 143 - 70 = 73^\circ$ $q = 460$	$\Delta t = 143 - 42,5 = 100,5^\circ$ $q = 740$	460	740	460	740
То же в конце сушки при $p = 3$ атм	Кал/м ²	$\Delta t = 143 - 75 = 68^\circ$ $q = 420$	$\Delta t = 143 - 58 = 85^\circ$ $q = 560$	420	560	420	560
Необходимая поверхность нагрева в начале сушки	м ²	$\frac{27720}{460} = 60,5$	$\frac{5930}{740} = 8,0$	$\frac{53\,140}{460} = 116,0$	$\frac{10\,570}{740} = 14,2$	$\frac{99\,520}{460} = 216,0$	$\frac{16\,860}{740} = 22,5$
То же в конце сушки	м ²	$\frac{28\,560}{420} = 68,0$	$\frac{7270}{560} = 13,0$	$\frac{55\,810}{420} = 133,0$	$\frac{12\,750}{560} = 22,8$	$\frac{104\,240}{420} = 250,0$	$\frac{19\,970}{560} = 35,6$

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Устанавливаются для отопления ребристые трубы	пог. м	6·6 = 36	2·6 = 12
Общая поверхность нагрева ребристых труб	м ²	72	24
Расход пара на сушку при коэффициенте использования пара 0,9 в начале сушки	кг/час	$\frac{27\ 720}{511 \cdot 0,9} = 60,0$	$\frac{5930}{511 \cdot 0,9} = 12,9$
То же в конце сушки	кг/час	$\frac{28\ 560}{511 \cdot 0,9} = 62,0$	$\frac{7270}{511 \cdot 0,9} = 15,7$
Расход тепла на 1 кг испаряемой влаги	Кал	$\frac{28\ 560}{28} = 1025$	$\frac{7270}{2,25} = 3250$
Расход пара на 1 кг влаги	кг/час	$\frac{62,0}{28} = 2,22$	$\frac{15,7}{2,25} = 7,00$
Расход пара на камеру при расчете паропровода принимаем	кг/час	1,1·62,0 ≈ 68	1,1·15,7 ≈ 17,5
Расход пара на пропарку 40% от расхода на отопление ¹	кг/час	62,0 $\frac{40}{100} \approx 25$	15,7 $\frac{40}{100} \approx 6$
Расход тепла на нагрев и испарение влаги	Кал/час	$i_{\text{вод. пара}} = 630,5 \text{ Кал/кг}$ 630,5·28 = 17 700	$i_{\text{вод. пара}} = 623,9 \text{ Кал/кг}$ 623,9·2 25 = 1400
Потеря тепла с отработанным воздухом	Кал/час	19 880—17 700 = 2180	1970—1400 = 570

¹ Ввиду малой разницы в расходах тепла в начале и в конце сушки, все тепловой баланс также. Однако для составления последнего — необходимо раз нагрев отработанного воздуха на две составляющие.

	Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
	для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
	6·12 = 72	2·12 = 24	12·12 = 144	4·12 = 48
	144	48	288	96
	$\frac{53\ 140}{511 \cdot 0,9} = 116,0$	$\frac{10\ 570}{511 \cdot 0,9} = 23,0$	$\frac{99\ 520}{511 \cdot 0,9} = 216$	$\frac{16\ 860}{511 \cdot 0,9} = 36,7$
	$\frac{55\ 810}{511 \cdot 0,9} = 121$	$\frac{12\ 750}{511 \cdot 0,9} = 27,6$	$\frac{104\ 240}{511 \cdot 0,9} = 227$	$\frac{19\ 970}{511 \cdot 0,9} = 43,5$
	$\frac{55\ 810}{56} = 1000$	$\frac{12\ 750}{4,5} = 2850$	$\frac{104\ 240}{112} = 930$	$\frac{19\ 970}{9} = 2220$
	$\frac{121}{56} = 2,16$	$\frac{27,6}{4,5} = 6,15$	$\frac{227}{212} = 2,03$	$\frac{43,5}{9} = 4,9$
	1,1·121 ≈ 135	1,1·27,6 ≈ 30	1,1·227 ≈ 250	1,1·43,5 ≈ 50
	121 $\frac{40}{100} \approx 48$	27,6 $\frac{40}{100} \approx 11$	227 $\frac{40}{100} \approx 91$	43,5 $\frac{40}{100} \approx 17$
	630,5·56 = 35 400	623,9·4,5 = 2800	630,5·112 = 70 800	623,9·9 = 5600
	39 760—35 400 = 4360	3940—2800 = 1140	79 520—70 800 = 8720	7800—5600 = 2280

приведенные выше удельные расходы отнесены к концу сушки и данный ниже делить первую статью расходов, т. е. расход тепла на испарение влаги и на

Тепловой

	Камера емкостью 10 м ³			
	для мягких пород		для твердых пород	
	Кал/час	%	Кал/час	%
Приход тепла с паром	28 560	100	7 270	100
Расход тепла				
1. Испарение влаги	17 700	62,0	1 400	19,3
2. Потеря тепла с отработанным воздухом	2 180	7,7	570	7,9
3. Прогрев материала	2 268	7,9	170	2,3
4. Потеря ограждениями	6 370	22,2	5 130	70,5
5. Прогрев вагонеток	42	0,2	—	—
Полный расход тепла	28 560	100	7 270	100

Для наглядности тепловой баланс камеры емкостью 40 м³ древесины пред На фиг. 4 дан баланс камеры для мягких пород.

Фиг. 5 представляет тепловой баланс камеры для твердых пород.

Анализ составленных балансов показывает, что экономичность камеры для твердых пород (к. п. д. = 28%). Это объясняется малыми значениями до определяет большие сроки сушки последнего и делает весьма ощутимыми по

ХАРАКТЕРИСТИКА КАМЕРЫ ДЛЯ СУШКИ ДЕРЕВА ПО ОТОПИТЕЛЬНОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМАМ

Мощность камеры, т. е. количество испаренной в ней влаги, зависит 1) от мощности отопительной системы и 2) от мощности вентиляционной системы.

При изменении режима сушки (t и φ) меняются количества тепла и воздуха, необходимые для испарения данного количества влаги.

Приведенным выше расчетом определяется мощность камеры лишь для нескольких частных случаев, тогда как в действительности приходится иметь дело с изменением режима в весьма широких пределах. Потому дается график в виде характеристики камеры, позволяющей найти ее предельную мощность при различных условиях (фиг. 6). При оси абсцисс отложены температуры отходящего из камеры воздуха, по оси ординат — значения W — количества испаряемой влаги в камере (кг/час).

баланс

	Камера емкостью 20 м ³				Камера емкостью 40 м ³			
	для мягких пород		для твердых пород		для мягких пород		для твердых пород	
	Кал/час	%	Кал/час	%	Кал/час	%	Кал/час	%
	55 810	100	12 750	100	104 240	100	19 970	100
	35 400	63,2	2 800	22,1	70 800	67,8	5 600	28,0
	4 360	7,9	1 140	8,9	8 720	8,4	2 280	11,4
	4 525	8,1	340	2,5	9 050	8,6	670	3,4
	11 440	20,6	8 470	66,5	15 500	15,0	11 420	57,2
	85	0,2	—	—	170	0,2	—	—
	55 810	100	12 750	100	104 240	100	19 970	100

ставлен графически.

для мягких пород (к. п. д. = 67,8%) значительно выше экономичности камеры пускаемой интенсивности испарения и случае сушки дерева твердых пород, что тери тепла ограждениями, составляющими 57,2% теплового баланса.

На диаграмме нанесены три пучка кривых:

1) кривые количества влаги при различных давлениях пара в системе отопления в зависимости от температуры воздуха, удаляемого из камеры для сушки мягких пород;

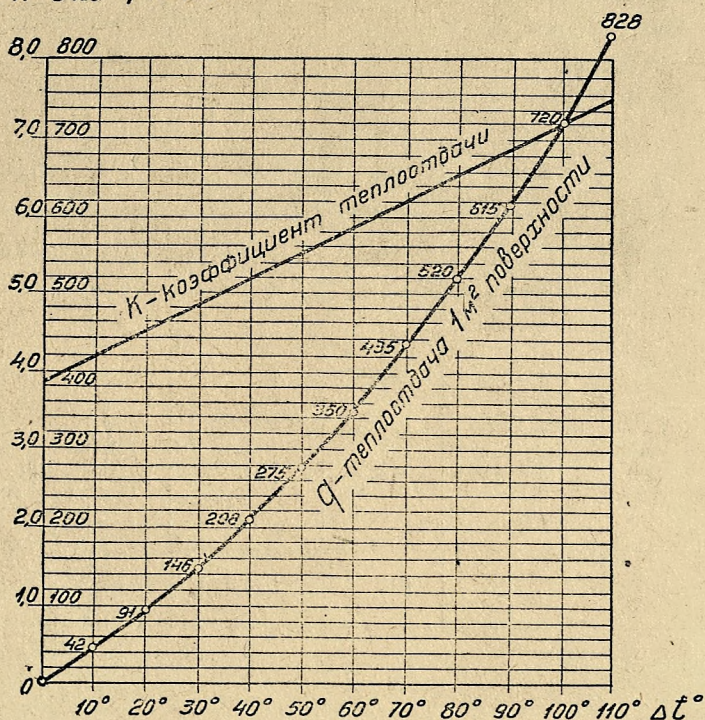
2) аналогичные кривые камеры для сушки твердых пород;

3) кривые количества испаренной влаги, определяемые вентиляционной системой сушила при различных температурах наружного воздуха и в зависимости от температуры удаляемого воздуха; вентиляционная система камер для сушки твердых и мягких пород запроектирована одинаковой, поэтому эти кривые относятся к камерам как для мягких, так и для твердых пород.

Из расчета, а также из построенных характеристик легко убедиться, что с увеличением температуры:

1) мощность камеры по отоплению падает, что объясняется уменьшением разности между температурой пара внутри приборов и температурой воздуха, и

$K \frac{\text{ккал.}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{час.}}$ $q \frac{\text{ккал.}}{\text{м}^2 \cdot \text{час.}}$



Фиг. 3.

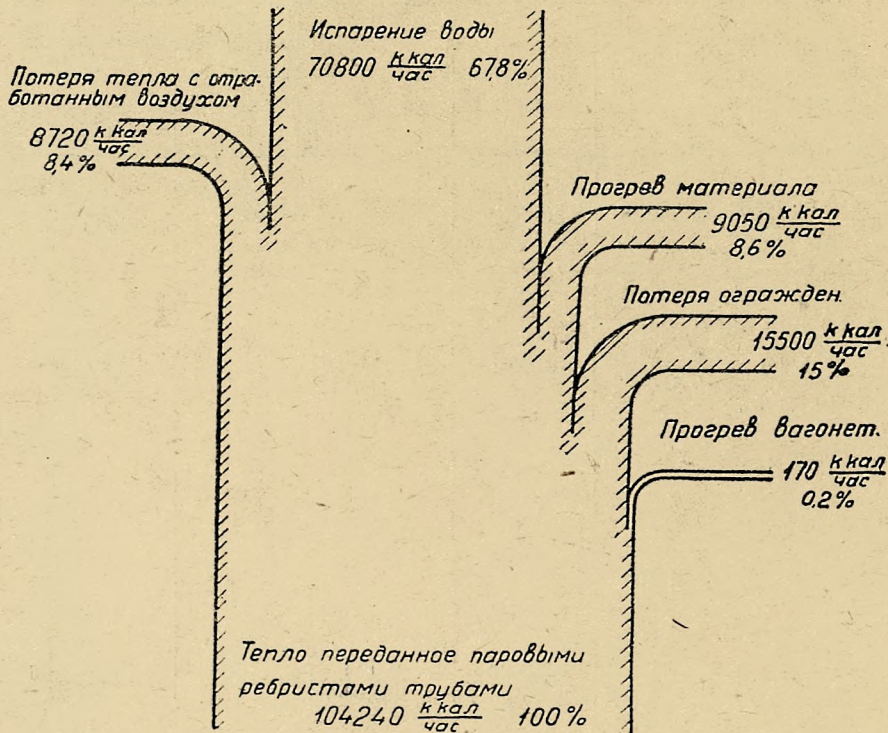
Сухой насыщенный пар			Сухой насыщенный пар		
Давление по манометру P	$t^\circ \text{C}$	Теплосодержание пара $t \text{ Кал/кг}$	Давление по манометру P	$t^\circ \text{C}$	Теплосодержание пара $t \text{ Кал/кг}$
0,00	100	638	4,00	151	655
0,20	104	641	5,00	158	657
0,50	110	642	6,00	164	659
1,00	120	646	7,00	170	661
1,50	127	648	8,00	175	663
2,00	133	650	9,00	179	664
2,50	138	651	10,00	183	665
3,00	143	653			

1. Коэффициент теплоотдачи 1 м² трубы взят по формуле Ратчеля (Чаплин) «Отопление и вентиляция» 1, стр. 160

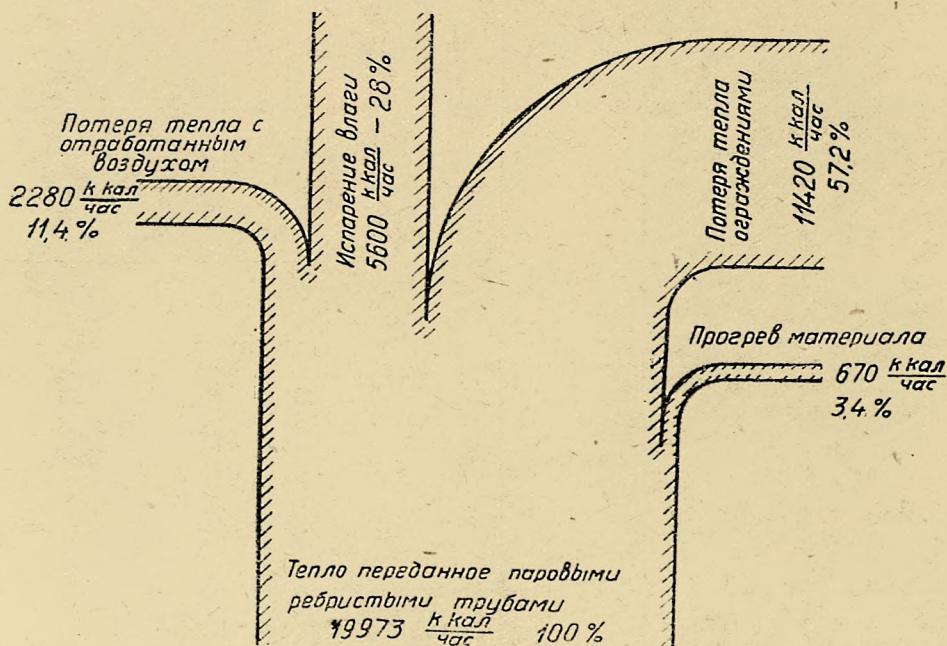
$$K = 3,9 + 0,033 \Delta t^\circ,$$

где $\Delta t^\circ = t^\circ \text{ пара} - t^\circ \text{ воздуха}$, омывающего трубу; соответственно $q = K \cdot \Delta t^\circ$.

2. Тепло, отдаваемое 1 кг пара $= t - t^\circ_{\text{к}}$, где $t^\circ_{\text{к}}$ — температура отходящего конденсата.



Фиг. 4. Тепловой баланс камеры для мягких пород.



Фиг. 5. Тепловой баланс камеры для твердых пород

Расчет вентиляцион

Наименование величин	Единицы измере- ния	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Максимальный расход воздуха	кг/час	5,5 · 28 = 154	29,0 · 2,25 = 65,25
То же при t ₀ и φ ₀ $L_0 = \frac{l_0 \left(1 + \frac{d_0}{1000}\right)}{\gamma_0}$	м ³ /час	$\frac{154 \cdot 1,008}{1,195} = 130$	$\frac{65,25 \cdot 1,008}{1,195} = 54,5$
То же	м ³ /сек	$\frac{130}{3600} = 0,036$	$\frac{54,5}{3600} = 0,015$
То же при t ₂ и φ ₂ $L_2 = \frac{l_0 \left(1 + \frac{d_2}{1000}\right)}{\gamma_2}$	м ³ /час	$\frac{154 \cdot 1,19}{0,908} = 202$	$\frac{65,25 \cdot 1,0426}{1,07} = 63$
То же	м ³ /сек	$\frac{202}{3600} = 0,056$	$\frac{63}{3600} = 0,018$
В камере запроектировано приточных каналов		2	2
Суммарное сечение кана- лов	м ²	2 (0,25 · 0,23)	
		0,115	0,115
Скорость воздуха в при- точном канале	м/сек	$\frac{0,036}{0,115} = 0,32$	$\frac{0,015}{0,115} = 0,13$
Сечение приточных отвер- стий	м ²	2 · 0,06 · 0,02 · 14	
		0,034	0,034
Скорость воздуха в при- точных отверстиях (коэф- фициент сужения струи — 0,8)	м/сек	$\frac{0,036}{0,8 \cdot 0,034} = 1,32$	$\frac{0,015}{0,8 \cdot 0,034} = 0,55$

ных устройств

	Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
	для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
	5,5 · 56 = 308	29,0 · 4,5 = 130,5	5,5 · 112 = 616	29,0 · 9 = 261
	$\frac{308 \cdot 1,008}{1,195} = 260$	$\frac{130,5 \cdot 1,008}{1,195} = 109$	$\frac{616 \cdot 1,008}{1,195} = 520$	$\frac{261 \cdot 1,008}{1,195} = 218$
	$\frac{260}{3600} = 0,072$	$\frac{109}{3600} = 0,03$	$\frac{520}{3600} = 0,144$	$\frac{218}{3600} = 0,06$
	$\frac{308 \cdot 1,19}{0,908} = 404$	$\frac{130,5 \cdot 1,0426}{1,07} = 126$	$\frac{616 \cdot 1,19}{0,908} = 808$	$\frac{261 \cdot 1,0426}{1,07} = 252$
	$\frac{404}{3600} = 0,112$	$\frac{126}{3600} = 0,035$	$\frac{808}{3600} = 0,224$	$\frac{252}{3600} = 0,070$
	2	2	3	3
	2 (0,25 · 0,23)		(0,52 + 2 · 0,26) 0,23	
	0,115	0,115	0,24	0,24
	$\frac{0,072}{0,115} = 0,63$	$\frac{0,03}{0,115} = 0,26$	$\frac{0,144}{0,24} = 0,6$	$\frac{0,06}{0,24} = 0,25$
	2 · 0,06 · 0,02 · 28		4 · 0,06 · 0,02 · 28	
	0,067	0,067	0,134	0,134
	$\frac{0,072}{0,8 \cdot 0,067} = 1,34$	$\frac{0,03}{0,8 \cdot 0,067} = 0,56$	$\frac{0,144}{0,8 \cdot 0,134} = 1,34$	$\frac{0,06}{0,8 \cdot 0,134} = 0,56$

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Отводящих каналов за- проектировано	—	1	1
Сечение отводящих кана- лов	м ²	0,51 ×	
		0,117	0,117
Скорость воздуха в отво- дящем канале	м/сек.	$\frac{0,056}{0,117} = 0,48$	$\frac{0,018}{0,117} = 0,154$
Сечение отверстий отво- дящего канала	м ²	23·0,08·0,02	
		0,037	0,037
Скорость воздуха в отвер- стиях отводящих каналов (коэффициент сужения струи 0,8)	м/сек	$\frac{0,056}{0,8 \cdot 0,037} = 1,89$	$\frac{0,018}{0,8 \cdot 0,037} = 0,61$
Сечение отводящей трубы	м ²	0,12·0,51 = 0,061	0,12·0,51 = 0,061
Скорость воздуха в трубе	м/сек	$\frac{0,056}{0,061} = 0,92$	$\frac{0,018}{0,061} = 0,3$
Падение давления при со- здании скорости в прито- чных каналах $\gamma = \frac{v^2}{2g}$	мм вод. ст.	$1,195 \cdot \frac{0,32^2}{2g} = 0,0062$	$1,195 \cdot \frac{0,13^2}{2g} = 0,001$
Сопротивление трения (эквивалентный диаметр $d = 240$) $\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \gamma \cdot \frac{v^2}{2g}$ 1)	мм вод. ст.	$0,05 \cdot \frac{7}{0,24} \cdot 0,0062 \cdot 0,33 = 0,0031$ 2)	$0,05 \cdot \frac{7}{0,24} \cdot 0,001 \cdot 0,33 = 0,0004$

1) При вычислении сопротивления трения $\lambda = 0,05$.

2) Так как скорость воздуха по длине каналов изменяется от первоначальной скорости до нуля, сопротивление трения будет составлять 0,33 от сопро-

	Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
	для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
	1	1	2	2
	× 0,23		2(0,51 × 0,23)	
	0,117	0,117	0,23	0,23
	$\frac{0,112}{0,117} = 0,96$	$\frac{0,035}{0,117} = 0,3$	$\frac{0,224}{0,23} = 0,97$	$\frac{0,07}{0,23} = 0,3$
	46·0,08·0,02		2·36·0,09·0,02	
	0,074	0,074	0,130	0,130
	$\frac{0,112}{0,8 \cdot 0,074} = 1,89$	$\frac{0,035}{0,8 \cdot 0,074} = 0,59$	$\frac{0,224}{0,8 \cdot 0,130} = 2,16$	$\frac{0,07}{0,8 \cdot 0,130} = 0,67$
	0,12·0,51 = 0,061	0,12·0,51 = 0,061	0,25·0,51 = 0,127	0,25·0,51 = 0,127
	$\frac{0,112}{0,061} = 1,84$	$\frac{0,035}{0,061} = 0,57$	$\frac{0,224}{0,127} = 1,76$	$\frac{0,07}{0,127} = 0,55$
	$1,195 \cdot \frac{0,63^2}{2g} = 0,024$	$1,195 \cdot \frac{0,26^2}{2g} = 0,0041$	$1,195 \cdot \frac{0,6^2}{2g} = 0,022$	$1,195 \cdot \frac{0,25^2}{2g} = 0,0038$
	$0,05 \cdot \frac{14}{0,24} \cdot 0,024 \cdot 0,33 = 0,23$	$0,05 \cdot \frac{14}{0,24} \cdot 0,0041 \cdot 0,33 = 0,004$	$0,05 \cdot \frac{14}{0,24} \cdot 0,022 \cdot 0,33 = 0,21$	$0,05 \cdot \frac{14}{0,24} \cdot 0,0038 \cdot 0,33 = 0,0035$

ной скорости до нуля, сопротивление трения будет составлять 0,33 от сопро-

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Падение давления при создании скорости в приточных отверстиях $\gamma \cdot \frac{v^2}{2g}$	мм вод. ст.	$1,195 \cdot \frac{1,32^2}{2g} = 0,106$	$1,195 \cdot \frac{0,55^2}{2g} = 0,019$
Полное падение давления в приточной системе	мм вод. ст.	$0,0062 + 0,0031 + 0,106 = 0,115$	$0,001 + 0,0004 + 0,019 = 0,020$
Падение давления при рождении скорости в отверстиях отводящих каналов $\gamma \cdot \frac{v^2}{2g}$	мм вод. ст.	$0,908 \cdot \frac{1,89^2}{2g} = 0,165$	$1,07 \cdot \frac{0,61^2}{2g} = 0,020$
Падение давления в отводящих каналах $\zeta \cdot \gamma \cdot \frac{v^2}{2g}$	мм вод. ст.	$1 \cdot 0,908 \cdot \frac{0,48^2}{2g} = 0,0107$	$1 \cdot 1,07 \cdot \frac{0,154^2}{2g} = 0,0013$
Сопротивление трения (эквивалентный диаметр $d = 320$ мм) $\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \gamma \cdot \frac{v^2}{2g}$	мм вод. ст.	$0,05 \cdot \frac{7,0}{0,32} \cdot 0,0107 \cdot 0,33 = 0,0036$	$0,05 \cdot \frac{7,0}{0,32} \cdot 0,0013 \cdot 0,33 = 0,0005$
Падение давления при рождении скорости в отводящей трубе $\gamma \cdot \frac{v^2}{2g}$	мм вод. ст.	$0,908 \cdot \frac{0,92^2}{2g} = 0,039$	$1,07 \cdot \frac{0,3^2}{2g} = 0,0049$
Полное сопротивление отводящей системы	мм вод. ст.	$0,165 + 0,0107 + 0,0036 + 0,039 = 0,218$	$0,020 + 0,0013 + 0,0005 + 0,0049 = 0,027$

1) ζ — коэффициент, учитывающий местные сопротивления.

Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
$1,195 \cdot \frac{1,34^2}{2g} = 0,109$	$1,195 \cdot \frac{0,56^2}{2g} = 0,019$	$1,195 \cdot \frac{1,34^2}{2g} = 0,109$	$1,195 \cdot \frac{0,56^2}{2g} = 0,019$
$0,024 + 0,23 + 0,109 = 0,363$	$0,0041 + 0,004 + 0,019 = 0,027$	$0,022 + 0,21 + 0,109 = 0,341$	$0,0038 + 0,0035 + 0,019 = 0,026$
$0,908 \cdot \frac{1,89^2}{2g} = 0,165$	$1,07 \cdot \frac{0,59^2}{2g} = 0,019$	$0,908 \cdot \frac{2,16^2}{2g} = 0,215$	$1,07 \cdot \frac{0,67^2}{2g} = 0,025$
$1 \cdot 0,908 \cdot \frac{0,96^2}{2g} = 0,043$	$1 \cdot 1,07 \cdot \frac{0,3^2}{2g} = 0,0049$	$2 \cdot 0,908 \cdot \frac{0,97^2}{2g} = 0,088$	$2 \cdot 1,07 \cdot \frac{0,3^2}{2g} = 0,0092$
$0,05 \cdot \frac{14}{0,32} \cdot 0,043 \cdot 0,33 = 0,031$	$0,05 \cdot \frac{14}{0,32} \cdot 0,0049 \cdot 0,33 = 0,0036$	$0,05 \cdot \frac{14}{0,32} \cdot 0,088 \cdot 0,33 = 0,063$	$0,05 \cdot \frac{14}{0,32} \cdot 0,0092 \cdot 0,33 = 0,0066$
$0,908 \cdot \frac{1,84^2}{2g} = 0,157$	$1,07 \cdot \frac{0,57^2}{2g} = 0,018$	$0,908 \cdot \frac{1,76^2}{2g} = 0,143$	$1,07 \cdot \frac{0,55^2}{2g} = 0,016$
$0,165 + 0,043 + 0,031 + 0,157 = 0,396$	$0,019 + 0,0049 + 0,0036 + 0,018 = 0,046$	$0,215 + 0,088 + 0,063 + 0,143 = 0,509$	$0,025 + 0,0092 + 0,0066 + 0,016 = 0,057$

Наименование величин	Единицы измерения	Камера емкостью 10 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород
Полное падение давления в вентиляционной системе	мм вод. ст.	$0,115 + 0,218 = 0,333$	$0,020 + 0,027 = 0,047$
Гидравлический напор, создаваемый разностью удельных весов атмосферного воздуха и воздуха внутри системы на 1 м трубы	мм вод. ст.	$1,153 - 0,908 = 0,245$	$1,153 - 1,07 = 0,083$
Положение ± 0 давления в камере, которое должно осуществиться для возможности работы приточной системы (от уровня приточного канала)	м	$\frac{0,115}{0,245} = 0,47$	$\frac{0,020}{0,083} = 0,27$
Необходимая высота трубы для преодоления сопротивления вентиляционной системы (от нулевой линии)	м	$\frac{0,333}{0,245} = 1,36$	$\frac{0,047}{0,083} = 0,57$
То же от основания трубы	м	$1,36 + 0,47 = 1,83$	$0,57 + 0,27 = 0,84$
Гидравлический напор, создаваемый запроектированной трубой высотой 6,5 м	мм вод. ст.	$0,245 \cdot 6,5 = 1,59$	$0,083 \cdot 6,5 = 0,54$

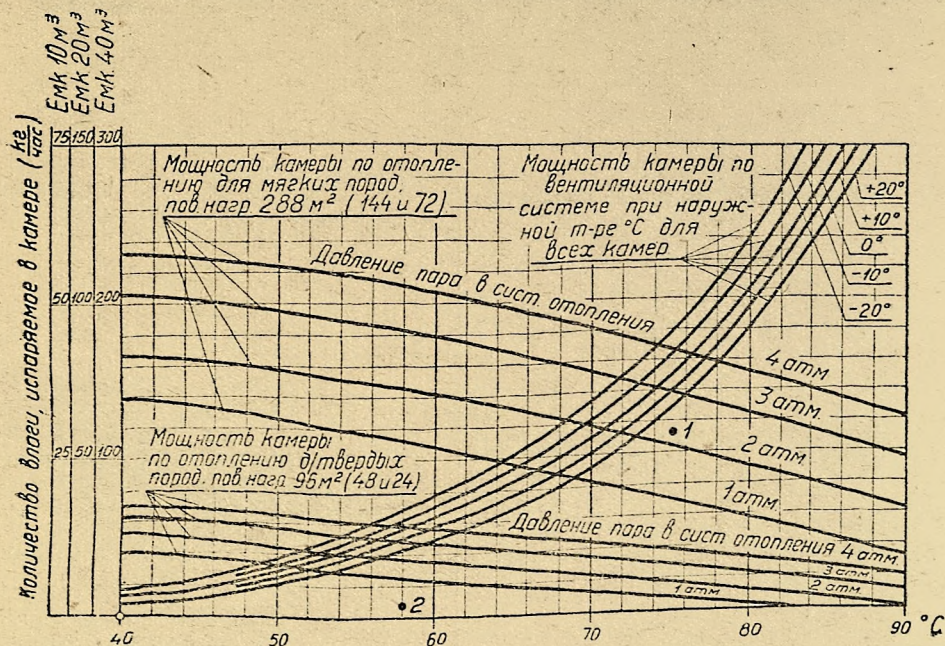
Гидравлический расчет камеры показывает, что отводящая труба вполне Помимо приведенных расчетов отопления и вентиляции камер, ниже при влаги в кг/час) при различных температурных условиях воздуха внутри и сна

		Камера емкостью 20 м ³		Камера емкостью 40 м ³	
		для мягких пород	для твердых пород	для мягких пород	для твердых пород
		$0,363 + 0,396 = 0,759$	$0,027 + 0,046 = 0,073$	$0,341 + 0,509 = 0,850$	$0,026 + 0,057 = 0,083$
		$1,153 - 0,908 = 0,245$	$1,153 - 1,07 = 0,083$	$1,153 - 0,908 = 0,245$	$1,153 - 1,07 = 0,083$
		$\frac{0,363}{0,245} = 1,44$	$\frac{0,027}{0,083} = 0,33$	$\frac{0,341}{0,245} = 1,40$	$\frac{0,026}{0,083} = 0,31$
		$\frac{0,759}{0,245} = 3,10$	$\frac{0,073}{0,083} = 0,88$	$\frac{0,850}{0,245} = 3,50$	$\frac{0,083}{0,083} = 1,00$
		$3,10 + 1,44 = 4,54$	$0,88 + 0,33 = 1,21$	$3,5 + 1,4 = 4,9$	$1,00 + 0,31 = 1,31$
		$0,245 \cdot 6,5 = 1,59$	$0,083 \cdot 6,5 = 0,54$	$0,245 \cdot 6,5 = 1,59$	$0,083 \cdot 6,5 = 0,54$

обеспечивает нормальную работу сушильных камер. водятся графики, характеризующие мощность камеры (количество испаряемой ружи камеры и при различных давлениях пара в системе отопления (см. фиг. 6).

2) мощность камеры по вентиляционной системе растет, так как с увеличением температуры расход воздуха для сушки уменьшается, а разрежение, создаваемое отводящей трубой, увеличивается.

Характеристики построены для условия, что относительная влажность воздуха φ равна 50%. Последняя мало влияет на работу приборов отопления, поэтому характеристика камеры по отоплению с изменением φ практически не меняется. С измене-



Фиг. 6. Характеристика мощности камер.

нием значений φ значительно меняется лишь расход воздуха на сушку, поэтому при других значениях относительной влажности воздуха, в кривые мощности камеры должны быть введены поправки, определяемые для каждого отдельного случая расчетом.

В дополнение к характеристикам дана табл. 2 (стр. 96) значений W при загрузке камеры другими породами. Характеристики составлены для камер емкостью 40 м³ (основной масштаб ординат), два вспомогательных масштаба ординат дают значения W для камер емкостью 20 и 10 м³.

Характеристические кривые для камер разной емкости изменяются незначительно и лежат в пределах точности наших расчетов.

УПРАВЛЕНИЕ, КОНТРОЛЬ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ КАМЕРНОГО СУШИЛА

УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ СУШИЛА

Не касаясь вопросов технологии сушки, методов определения влажности и возникающих в дереве внутренних напряжений, которые достаточно хорошо освещены как в советской, так и в иностранной литературе, например в трудах Келера и Телена (Koehler a. Thelen), в статье инж. Лурье в „Известиях Теплотехнического института“ за 1929 г. в книге „Камерная сушка дерева“, инж. Селюгина и других, остановимся исключительно на управлении сушильной камерой и на регулировании влажности и температуры воздуха внутри нее.

Сушило периодического действия системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло отличается простотой и легкостью регулировки, что оказывает большое влияние на весь процесс сушки. Двумя главными рычагами управления — вентилем отопления и шибером у отводящей трубы — в сушиле этой системы легко установить необходимые для сушки древесины режимы.

Температура воздуха внутри камеры регулируется вентилем отопления, влажность же его — шибером у отводящей трубы. Шибер служит как для понижения, так и для повышения влажности воздуха в камере. При открывании шибера количество удаляемого влажного воздуха увеличивается; на его место через приточные каналы поступает свежий, менее влажный воздух. Путем прикрывания шибера отбор влажного воздуха уменьшается.

Как показывает практика, последнее обстоятельство обычно сушильщиками не учитывается; повышение влажности достигается не путем прикрывания шибера, а главным образом за счет впуска свежего пара. Впуск свежего пара в правильно сконструированных сушилах, какими являются сушила системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло, при умелом управлении камерой, должен применяться в случае обработки воздухом высокой влажности или же при сушке материала с незначительным начальным влагосодержанием.

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУХА В СУШИЛЕ

Вентили отопления и пропарки и шибер отводящей трубы находятся в коридоре управления (см. атлас, черт. № 21215), где помещаются также самопишущие приборы. На случай отсутствия последних запроецированы окна для наблюдения за показаниями психрометров Августа.

Самопишущие приборы и психрометры Августа служат для определения состояния воздуха внутри сушильной камеры и дают возможность сушильщику своевременно его изменять. Принцип работы психрометра мы не приводим, считая его достаточно хорошо известным. Безусловно желательна установка самопишущих приборов (типа Foxboro Co), так как благодаря им значительно упрощается наблюдение за состоянием температуры и влажности в процессе сушки.

Ввиду того что режимы медиссоновской лаборатории определяют состояние воздуха при входе в штабель, где условия наиболее жесткие, в сушилах системы В. Е. Грум-Гржимайло, в соответствии с движением воздуха, психрометр должен устанавливаться на верху штабеля, под потолком камеры, в противном случае показания психрометра не являются точными.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУШИЛА

Перед сушильщиком стоит задача — подвергать сушке материал с минимальным выходом брака, без нарушения нормальной производительности сушила и без увеличения стоимости сушки. Не касаясь дефектов, происходящих из-за неправильного режима сушки, неправильной штабелевки и т. д., отметим, что при эксплуатации сушила следует большое внимание уделять своевременному ремонту сушильной камеры, так как не вовремя произведенный ремонт вызывает часто длительные простои камер, которые нарушают производительность сушила или влекут за собой нерациональное сокращение длительности сушки.

Периодический внимательный осмотр сушильных камер должен входить в обязанность сушильщика. При осмотре следует помнить конструктивные особенности, как ограждений сушильной камеры, так и ее оборудования.

Ограждения камеры

Плотность и непроницаемость стен и потолка все время должны поддерживаться специальной прокраской внутренних поверхностей асфальтовым лаком или высокосортной краской, за исключением стен, выложенных из глазурованных пустотелых черепичных камней.

Осаждение конденсата на внутренних поверхностях стен и потолка и трудность поддержания влажного режима внутри камеры свидетельствуют о том, что теплопроводность и невлагоемкость ограждений нарушены.

Особенно большое внимание должно быть уделено самому слабому месту сушильной камеры — дверям, требующим наиболее частого ремонта. Неплотность дверей увеличивает расход пара на сушку и нарушает правильную циркуляцию воздуха в камере, что служит причиной неравномерной сушки материала и в связи с этим образования трещин на торцах, обращенных к дверям. Покраска внутренней поверхности двери асфальтовым лаком обязательна.

Оборудование

Опоры. Крепость и надежность опор периодически проверяется. При расстройстве их возможны перекосы вагонеток и распадаение штабеля со всеми вытекающими отсюда затруднениями. Железные опоры со временем от действия выделяющихся при сушке дерева кислот, несмотря на специальную окраску, подвергаются коррозии.

Отопление. Часто простои сушильных камер и увеличение расхода пара связаны с дефектами в отопительно-конденсационной сети. Засорение поверхности ребристых труб уменьшает их теплоотдачу, а иногда даже изменяет направление движения циркулирующего в камере воздуха. Необходимо следить за тем, чтобы было достаточное давление в паропроводе и чтобы нигде не было утечки пара; последнее явление обычно наблюдается во фланцевых соединениях.

Тщательно должна контролироваться работа конденсационных горшков, так как в случае пропускания пара или задержки конденсата правильная работа отопительной системы будет нарушена.

Шибера. Условия работы шибера, а именно влажный воздух и кислотные испарения, выделяющиеся при сушке древесины, способствуют быстрой коррозии. Для защиты от коррозии поверхность шибера должна периодически покрываться асфальтовым лаком.

Кончая настоящую статью, отметим, что в сушильном цехе необходимо, как правило, регулярно производить очистку камер от мусора, в особенности приточных и отводящих каналов.

ЭЛЕМЕНТЫ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТУННЕЛЬНЫХ СУШИЛ

ПРОЦЕСС В $I - \alpha$ -ДИАГРАММЕ СУШИЛА С ПЕРЕМЕННЫМ РАСХОДОМ ТЕПЛА И ВОЗДУХА У МАТЕРИАЛА

Непрерывно действующее сушило системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло характеризуется переменным расходом тепла и воздуха, по длине туннеля. В каждую зону туннеля воздух подается через ряд отверстий приточного канала, расположенного вдоль сушила; по длине туннеля возникает винтообразное движение воздуха¹.

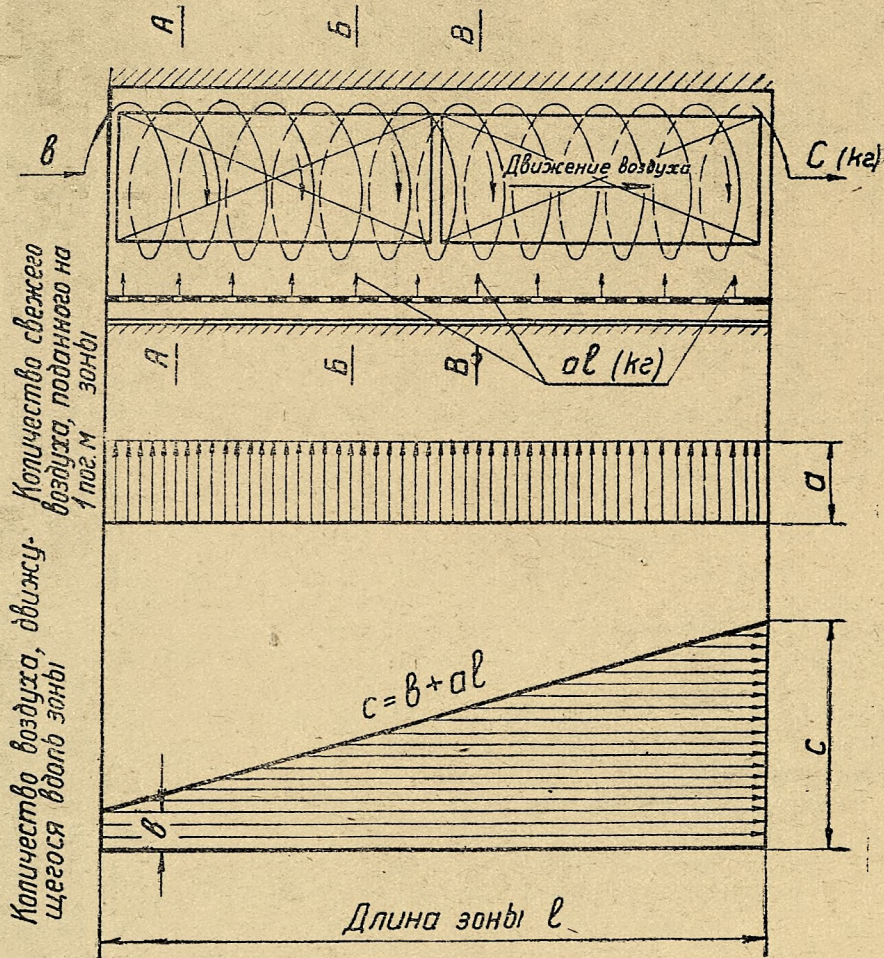
Работа такого сушила может быть охарактеризована двумя графиками, данными на фиг. 1, и схемой движения воздуха в туннеле. Верхний график определяет количество свежего воздуха, подаваемого на 1 пог. м длины туннеля, которое в данном случае сушил выражается прямой, параллельной оси абсцисс. На нижней диаграмме представлено количество воздуха, движущегося вдоль данной зоны туннеля. Изменение количества воздуха, движущегося по длине данной зоны, характеризуется тангенсом угла наклона прямой относительно оси абсцисс и определяется интенсивностью подачи воздуха на 1 пог. м длины данной зоны туннеля ($кг/м$).

В $I - \alpha$ -диаграмме этот процесс можно представить в следующем виде (фиг. 2).

Струйки свежего воздуха с состоянием o , поступающие из приточных отверстий между сечениями $A-A$ и $B-B$ (фиг. 1) данной зоны туннеля, попадают и смешиваются с потоком воздуха, направленным из-под сушимого штабеля к ребристой трубе; последний характеризуется состоянием a_1 , точка их смеси c_1 будет лежать на прямой oa_1 ; положение точки c_1 зависит от кратности циркуляции в данном сечении зоны туннеля. С увеличением последней точка c_1 будет приближаться к состоянию воздуха a_1 .

¹ Подробнее об этом — см. статью „Сушило непрерывного действия для дерева системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло“, стр. 142.

Смешанный воздух состояния c_1 нагревается о паровые ребристые трубы до состояния b_1 (процесс $d = \text{const}$). Процесс сушки материала, характеризуемый в идеальном сушиле процессом $I = \text{const}$, приведет состояние воздуха в точку a_2 .

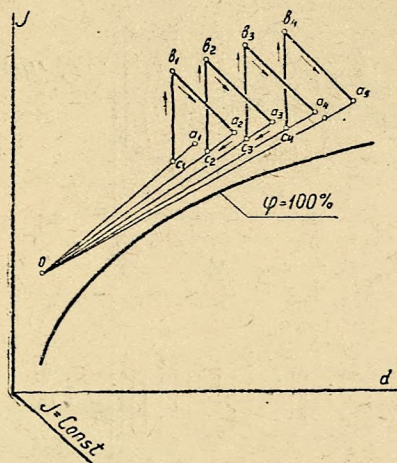


Фиг. 1. Схема винтообразного движения воздуха в туннеле системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло.

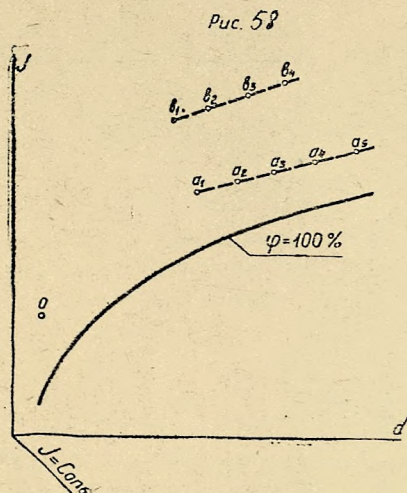
Верхний график — интенсивность подачи свежего воздуха в данную зону туннеля; нижний график — количество воздуха, движущегося вдоль данной зоны туннеля.

Струйки наружного воздуха, поступающие через следующие приточные отверстия между сечениями B-B и B-B (фиг. 1) данной зоны, попадают уже в пространство с воздухом нового состояния a_2 . Точка их смеси c_2 будет лежать на прямой oa_2 . Нагрев смеси ($d = \text{const}$) приведет процесс в точку b_2 . Процесс сушки приведет конечный процесс в сечении B-B в точку a_3 на диаграмме.

Аналогично эти процессы могут быть построены и в других последующих сечениях и зонах рассматриваемого туннеля, которые и в $I-d$ -диаграмме отобразятся также некоторой винтообразной фигурой $a_1-c_1-b_1-a_2-c_2-b_2-a_3-c_3-b_3$ и т. д., которая показывает последовательное изменение состояния воздуха по объему туннеля.



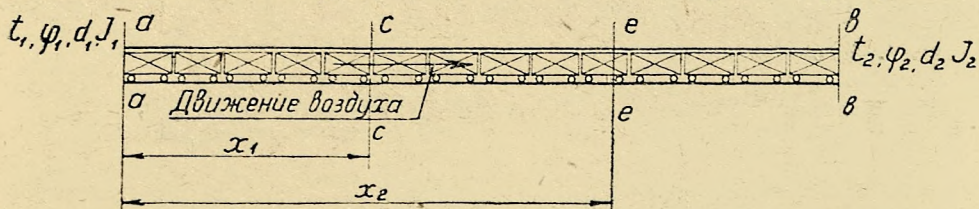
Фиг. 2. Процесс туннельного сушила системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло в $I-d$ -диаграмме.



Фиг. 3. Режим туннельного сушила системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло в $d-I$ -диаграмме.

Таким образом в $I-d$ -диаграмме мы получим ряд значений состояния воздуха по длине туннеля (фиг. 3), характеризуемых над материалом рядом точек b_1, b_2, b_3, b_4 и т. д. и под материалом геометрическим местом точек a_1, a_2, a_3, a_4 и т. д.

Эти точки в $I-d$ -диаграмме являются отображением теплового режима разбираемого туннельного сушила. Их положение зависит как от количества испаряемой влаги, так и от количества тепла и воздуха, подаваемых в данную зону туннеля.



Фиг. 4. Схема противоточного туннельного сушила с постоянным расходом воздуха у материала.

Для определения потребных для данной зоны туннеля количеств тепла и воздуха, зависящих от интенсивности испарения, разберем связь этих величин в $I-d$ -диаграмме.

ГРАФИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ КОЛИЧЕСТВОМ ВЫПАРЕННОЙ ВЛАГИ, РАСХОДОМ ВОЗДУХА И РЕЖИМОМ СУШКИ

Диаграмма $I-d$ построена для 1 кг воздуха, тогда как в рассматриваемой системе сушила количество воздуха непрерывно меняется. Эти изменения возможно учесть с помощью дополнительного построения в $I-d$ -диаграмме.

Разберем сначала наиболее простой случай противоточного туннельного сушила с постоянным расходом воздуха по длине. На фиг. 4 дана схема туннельного противоточного сушила, где направление воздуха показано стрелкой; материал движется в обратном направлении.

Свежий воздух нагревается в калорифере, расположенном вне сушила, и подходит к материалу с сухого конца туннеля через сечение aa с состоянием t_1, φ_1, d_1 и I_1 . На $I-d$ -диаграмме (фиг. 5) эта точка соответствует точке a . Пройдя вдоль туннеля, воздух испаряет на своем пути влагу из противоположного конца туннеля через сечение bb с состоянием t_2, φ_2, d_2 и I_2 . В $I-d$ -диаграмме процесс сушки туннеля изобразится линией ab (фиг. 5). Количество влаги, испаряемой из рассматриваемого сушила, будет выражаться следующей зависимостью, вытекающей из элементарной теории сушки:

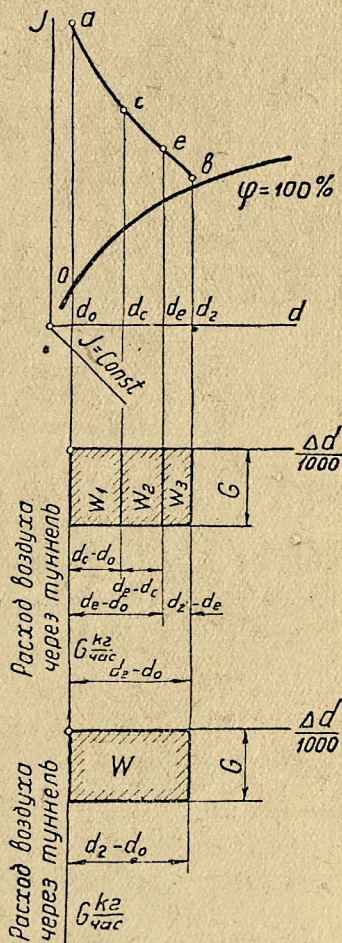
$$W = G \cdot \frac{d_2 - d_0}{1000} = G \cdot \frac{\Delta d}{1000}$$

где W — часовое количество испаряемой влаги (кг/час);

G — расход абсолютно сухого воздуха, проходящего через туннель (кг/час);

$d_2 - d_0$ — приращение влагосодержания воздуха вдоль туннеля s на 1 кг абс. сухого воздуха.

Если по оси абсцисс отложить значение $\frac{d_2 - d_0}{1000}$ и по оси ординат значение G , то количество испаряемой влаги, являющееся их произведением, будет выражаться площадью прямоугольника, построенного на отложенных отрезках $\frac{d_2 - d_0}{1000}$ и G .



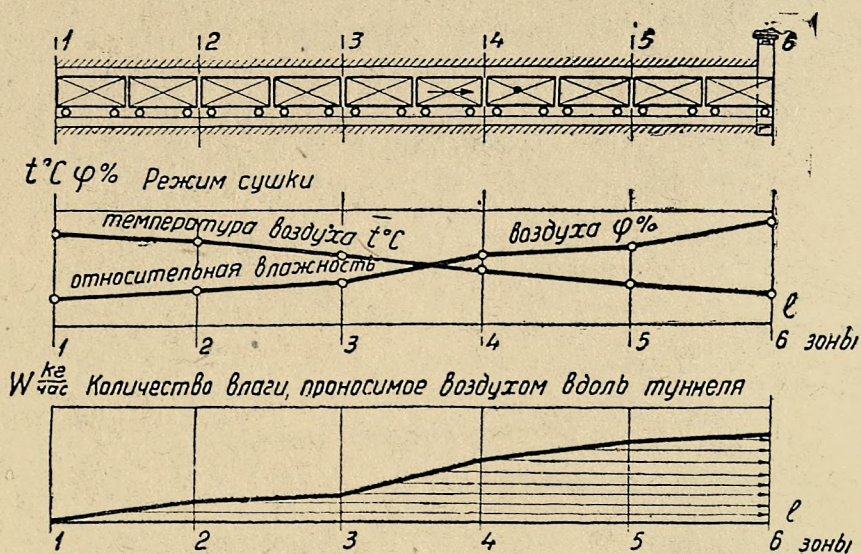
Фиг. 5. Процесс противоточного сушила в $I-d$ -диаграмме и графическая связь количества испаряемой влаги, расхода воздуха и приращения его влагосодержания вдоль туннеля.

Практически это построение удобно производить непосредственно на $I-d$ -диаграмме, где значения d_2 и d_0 уже имеются

Возьмем на фиг. 4 два промежуточных сечения $сс$ и $ее$ на расстоянии x_1 и x_0 от сухого торца туннеля. На $I-d$ -диаграмме состояния воздуха в указанных сечениях будут расположены на кривой ab .

Расположение точек $с$ и $е$ на кривой ab объясняется постоянным количеством воздуха, движущегося вдоль туннеля при отсутствии промежуточного его подогрева по длине сушила.

На дополнительном построении, как указано выше, постоянный расход воздуха вдоль туннеля G_a характеризуется прямой,



Фиг. 6. Схема туннеля с переменным расходом воздуха по длине, тепловой режим туннеля и количество испаряемой влаги.

параллельной оси Δd . В этом случае, однако, приращения влажностердержаний на участках $ас$, $се$ и $еб$ (фиг. 5) будут меньше чем на всей длине ab , и количества испаряемой влаги W_1 , W_2 и W_3 на участках $ас$, $се$ и $еб$ будут выражаться площадями прямоугольников с общей ординатой.

Таким образом дополнительное построение в $I-d$ -диаграмме позволяет графически увязать основные величины, характеризующие процесс сушки как на всей длине противоточного туннеля, так и на отдельных его участках.

Разберем более сложный случай расчета сушила с переменным расходом воздуха по длине.

На фиг. 6. дана схема такого сушила. Воздух поступает с торца туннеля и движется по стрелке; на пути вдоль туннеля к нему в разных зонах добавляются дополнительные количества

воздуха. Таким образом движущийся навстречу воздушному потоку материал омывается в разных зонах различными количествами воздуха.

По длине туннель разделен на зоны, ограниченные плоскостями 1, 2, 3, 4, 5 и 6.

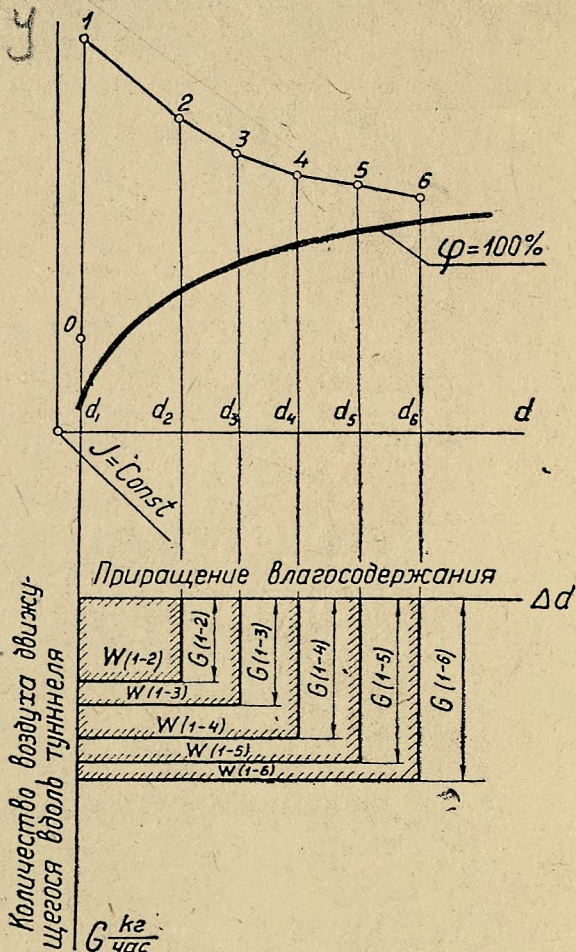
В плоскостях 1, 2... 5, 6 задаем изменение теплового режима, которое изображено на графике (фиг. 6), где даны изменения температуры (t) и относительной влажности воздуха (φ) по длине туннеля.

На графике фиг. 6 дано количество влаги, проносимое потоком воздуха вдоль туннеля, или количество влаги, испаряемое по длине туннеля. На $I-d$ -диаграмме режим сушки изобразится точками 1, 2... 6 (фиг. 7), которые определяют приращение влагосодержания воздуха на дополнительном построении.

Отложив на оси ординат количество воздуха, движущегося вдоль туннеля (кг/час), строим на графике прямоугольники W_{1-2} , W_{1-3} , W_{1-4} , W_{1-5} , W_{1-6} , с площадями, пропорциональными количествами влаги, испаряемой на участках 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 и 1-6.

Прямоугольник W_{1-2} , отображающий количество влаги, испаряемое на участке туннеля 1-2, будет ограничен на оси абсцисс отрезком (d_2-d_1)—приращением влагосодержания воздуха на рассматриваемом участке и на оси ординат отрезком G_{1-2} —

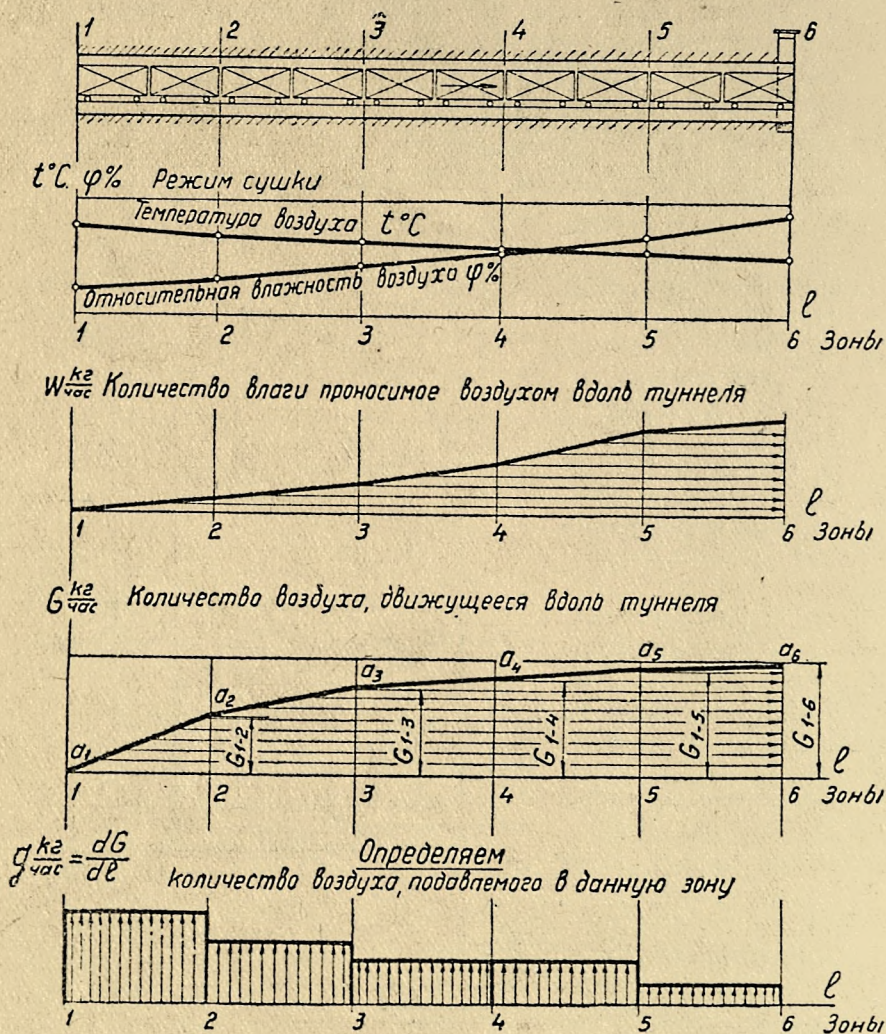
искомым количеством воздуха, поданным на том же участке; следующий прямоугольник W_{1-3} ограничен отрезками d_3-d_1 и G_{1-3} , характеризующими приращение влагосодержания и количество воздуха, поданного на участке 1-3. Все остальные прямо-



Фиг. 7. Процесс в $I-d$ -диаграмме туннеля с переменным расходом воздуха по длине и графическая связь количеств испаренной влаги, расхода воздуха и приращения его влагосодержания.

угольники также ограничены соответственными отрезками Δd и G .

Количество воздуха, поданного на участке 2—3, определится разностью ординат $\Delta G = G_{1-3} - G_{1-2}$. Количество воздуха, подан-



Фиг. 8. Схема туннельного сушила системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло тепловой режим, количество испаренной влаги, продольный поток воздуха и интенсивность его подачи в отдельные зоны.

ное в другие участки, может быть получено аналогичным путем и не представит затруднений.

Приложим аналогичное построение к расчету сушила непрерывного действия системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло.

На фиг. 8 дана схема туннеля этой системы, где воздух движется вдоль туннеля по стрелке и, кроме того, многократно циркулирует в поперечных сечениях туннеля (в плоскостях, перпендикулярных плоскости чертежа). Материал движется в обратном направлении.

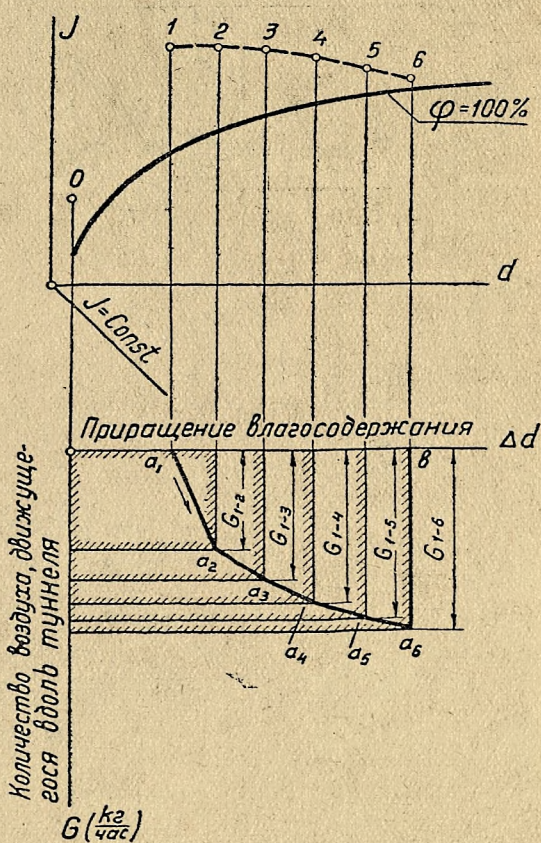
Делим туннель по длине на зоны, ограниченные плоскостями 1, 2, 3, 4, 5 и 6. В плоскостях 1, 2 . . . 5, 6 задаем изменение теплового режима температуры и относительной влажности воздуха, которые нанесены на графике (фиг. 8). Там же дано количество влаги, проносимое воздухом вдоль туннеля, равное количеству испаряемой влаги на данной длине туннеля.

Количество воздуха, поданное на участках 1—2 (фиг. 8) равно, как указывалось выше, потоку воздуха, движущегося вдоль туннеля через сечение 2. Количества воздуха на участках 1—3, 1—4 и т. д. будут соответственно равны потоку воздуха в сечениях 3, 4 и т. д.

Таким образом для определения необходимых количеств воздуха, подаваемых в данную зону, достаточно определить поток воздуха, движущегося вдоль туннеля. Это количество определяем путем разобранного выше построения в $I-d$ -диаграмме (фиг. 9).

Как указывалось выше, состояния воздуха над и под материалом в данной зоне туннеля будут различны. Для упрощения дальнейших рассуждений будем считать, что изображенные в $I-d$ -диаграмме точки 1, 2 и т. д. соответствуют некоторым средним состояниям воздуха, проходящим через границы зон туннеля.

Дополнительное построение для определения продольного потока воздуха изображено на той же фиг. 9 и строится аналогично предыдущему построению (фиг. 7), отличаясь от него на-



Фиг. 9. Процесс в $I-d$ -диаграмме туннеля системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло и графическая связь количества испаряемой влаги, расхода воздуха и его влагосодержания.

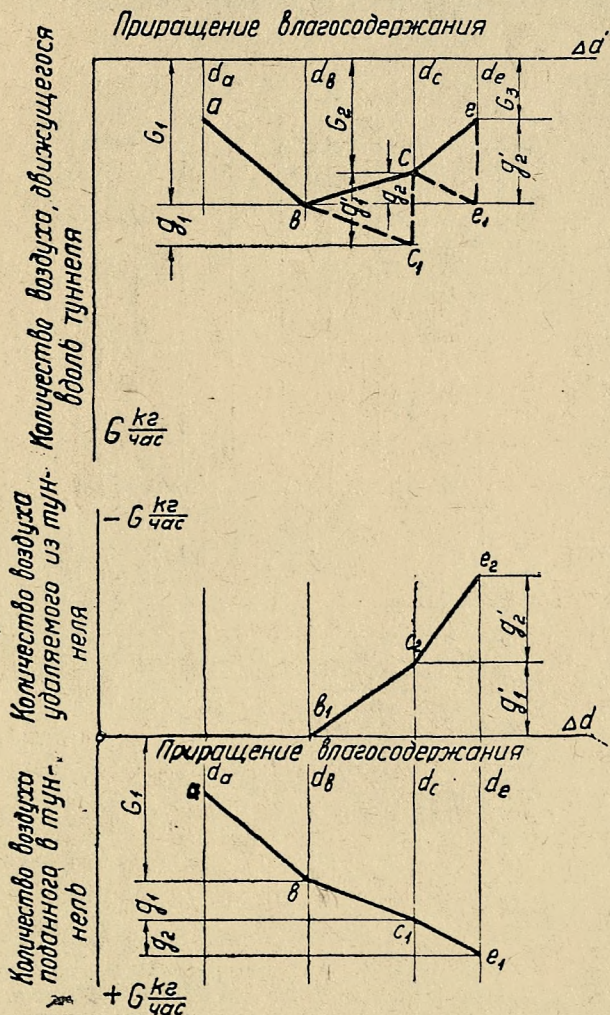
несенной кривой воздушного потока a_1, a_2, a_3 и т. д., движущегося вдоль туннеля.

Изображение первого участка зависит от способа подвода воздуха.

В сушиле системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло воздух подводится через приточные каналы по бокам сушила. Непосредственно с сухого конца туннеля воздух не поступает, и поток воздуха вдоль туннеля в сечении 1 будет равен нулю. Воздух подводится через приточные отверстия равномерно вдоль всего первого участка 1—2, поэтому поток воздуха вдоль туннеля на этом участке выразится прямой $a_1 - a_2$. Аналогично на участках 2—3, 3—4 и т. д. получим прямые $a_2 - a_3, a_3 - a_4$ и т. д., отображающие поток воздуха на соответствующих участках.

Перестраиваем полученную ломаную линию потока воздуха по длине туннеля (фиг. 8). Не трудно видеть, что $\frac{dG}{dl}$, или тангенс угла наклона отдельных отрезков этой ломаной, дает интенсивность подачи свежего воздуха на единице

Фиг. 10. Определение продольного потока воздуха в случае одновременной подачи и отбора воздуха по его длине.



длины данной зоны туннеля ($кг/м \cdot час$):

$$g_0 = \frac{dG}{dl}$$

На фиг. 8 представлена дифференциальная кривая $\frac{dG}{dl}$, по которой надлежит рассчитывать приточные каналы сушила.

Во всех разобранных выше схемах туннеля весь отработанный воздух удалялся в одном месте, во влажном торце туннеля. Это выразится на дополнительном построении прямой a_6b (фиг. 9), причем ломаная $a_1a_2\dots a_6b$ отображает изменение потока воздуха вдоль туннеля.

В некоторых случаях для осуществления заданного режима или из конструктивных соображений может встретиться необходимость отбора воздуха на некоторой длине какой-либо зоны туннеля. В этом случае наше построение примет вид, изображенный на фиг. 10, где прямая ab отображает поток воздуха, движущийся в предшествующей зоне. На границе этой зоны поступает G_1 воздуха при влагосодержании d_a , в разбираемой зоне к воздуху добавляется g_1 воздуха и отбирается g'_1 воздуха. Режим сушки в конце зоны характеризуется влагосодержанием воздуха d_c .

Подача g_1 воздуха привела бы процесс в точку c_1 , однако, в этой же зоне нужно отобрать g'_1 отработанного воздуха, который отобразится пунктиром $c_1c = g'_1$ в противоположном подаче воздуха направлении, т. е. количество воздуха в конце зоны будет выражено

$$G_2 = G_1 + g_1 - g'_1$$

а изменение потока воздуха вдоль разбираемой зоны выразится прямой bc . Аналогично можно провести построение в следующей зоне, процесс которой выразится прямой ce , и количество воздуха в конце следующей зоны выразится:

$$G_3 = G_2 + g_2 - g'_2$$

Для наглядности приведенная кривая перестроена на две составляющие кривые, которые отображают потоки приточного (кривая abc_1e_1) и отработанного (кривая $b_1c_2e_2$) воздуха отдельно.

Таким образом в случае одновременной подачи и отбора воздуха в какой-либо зоне туннеля принцип построения остается один и тот же, меняется лишь характер наклона прямой, отображающей воздушный поток вдоль туннеля.

ГРАФИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ РАСХОДОМ ВОЗДУХА, РАСХОДОМ ТЕПЛА И РЕЖИМОМ СУШКИ

Определив подачу нужного количества воздуха по зонам, переходим к определению необходимых для сушки количеств тепла. Аналитически расход тепла на сушку вместе с расходом тепла, теряемого с уходящим из сушила воздухом, выражается следующей зависимостью:

$$Q = G(I_2 - I_0) = G \cdot \Delta I$$

де G — расход сухого воздуха ($кг/час$),

I_2 — теплосодержание отработанного воздуха на 1 $кг$ абс. сухого воздуха ($Кал$) и

I_0 — теплосодержание свежего воздуха на 1 кг абс. сухого воздуха (Кал).

Откладываем (фиг. 11) по оси абсцисс значения ΔI и по оси ординат значения G . На полученной диаграмме количество потребного на сушку тепла выразится заштрихованной площадью прямоугольника, построенного на отложенных отрезках $(I_2 - I_0)$ и G .

Практически это построение, так же как и предыдущие, удобно производить непосредственно на $I-d$ -диаграмме, где значения I_2 и I_0 уже имеются.

Применяем наше новое построение к разобранным выше туннелю (фиг. 4) с чистым противотоком. На фиг. 12 дан процесс такого сушила в $I-d$ -диаграмме, который изображен прямой $o-a$ (нагрев в калорифере) и кривой $a-c-e-b$.

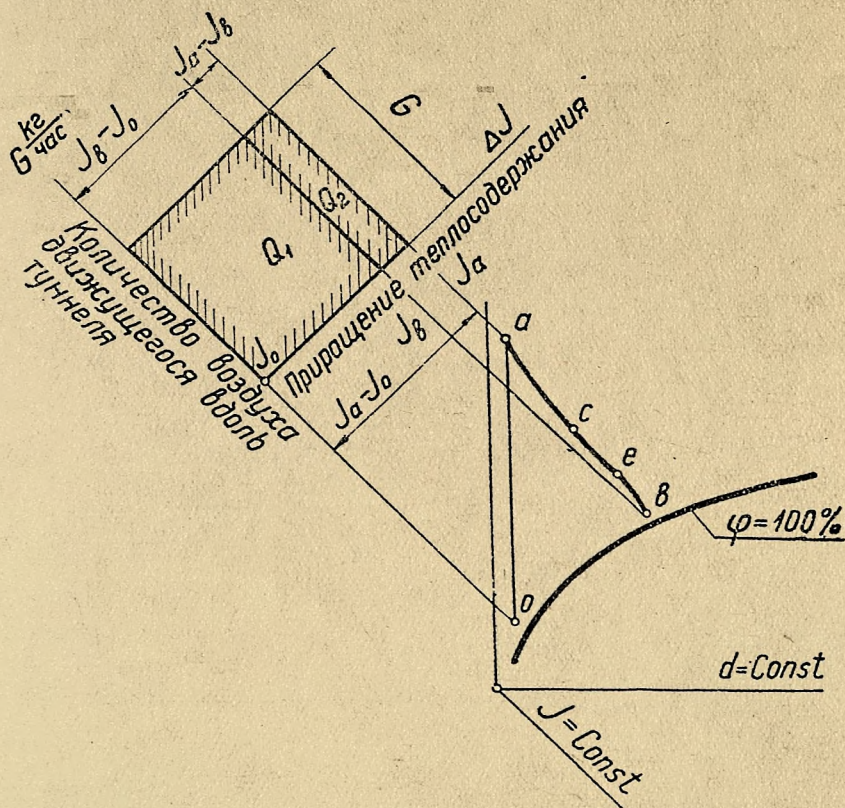


Фиг. 11. Графическая связь количеств тепла, воздуха и приращения его теплосодержания.

Начальное теплосодержание воздуха, подаваемого в калорифер, с состоянием o равно I_0 . Процесс нагрева в калорифере идет при $d = \text{const}$, и к материалу с сухого конца туннеля воздух подается с состоянием a . Теплосодержание его равно I_a .

Поток воздуха G вдоль туннеля, определенный ранее, остается неизменным по всей длине калорифера и туннеля и выразится прямой, параллельной оси абсцисс. Количество тепла, сообщенное воздуху в калорифере составляет $Q = G(I_a - I_0)$ и выразится на нашем новом построении площадью прямоугольника, построенного на отрезках $(I_a - I_0)$ и G . Если бы сушила не имело потерь, и материал имел бы $\vartheta = 0^\circ$ (стр. 56), то конечное состояние воздуха в точке b характеризовалось бы теплосодержанием $I_b - I_a = \text{const}$. Потери тепла в противоточном туннеле, где отсутствует промежуточный подогрев, отнимают у воздуха некоторое количество тепла, и воздух из сушила уходит с теплосодержанием $I_b < I_a$, причем количество тепла, отдаваемое воздухом на преодоление тепловых потерь туннеля, выразится площадью

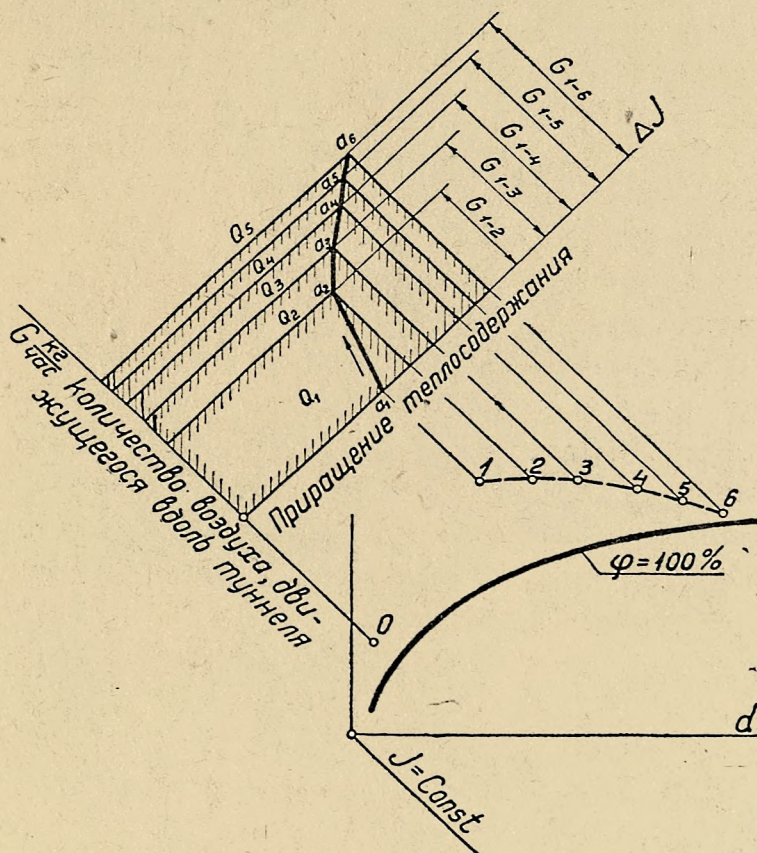
прямоугольника Q_2 со сторонами $(I_a - I_b)$ и G , количество же тепла, теряемое с обработанным воздухом (точка b) и затрачиваемое на испарение влаги в туннеле (полезное тепло) выразится площадью прямоугольника Q_1 со сторонами $(I_b - I_a)$ и G . Аналогичным путем можно определить количество тепла, теряемое на каких-либо других промежуточных участках, характеризующихся на $I-d$ -диаграмме точками c и e .



Фиг. 12. Графическая связь количеств тепла, воздуха и приращения его теплосодержания применительно к противоточному туннелю.

Опуская разбор второго по сложности случая расчета сушила с переменным расходом воздуха, разберем наше построение применительно к туннелю системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло, схема которого уже давалась на фиг. 8. Для определения расхода тепла на длине туннеля 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 и 1-6 откладываем на построении (фиг. 13) расход воздуха на этих участках и строим на продолжении прямых $l = \text{const}$ прямоугольники, площади которых $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_6$ и соответствуют расходу тепла на этих участках.

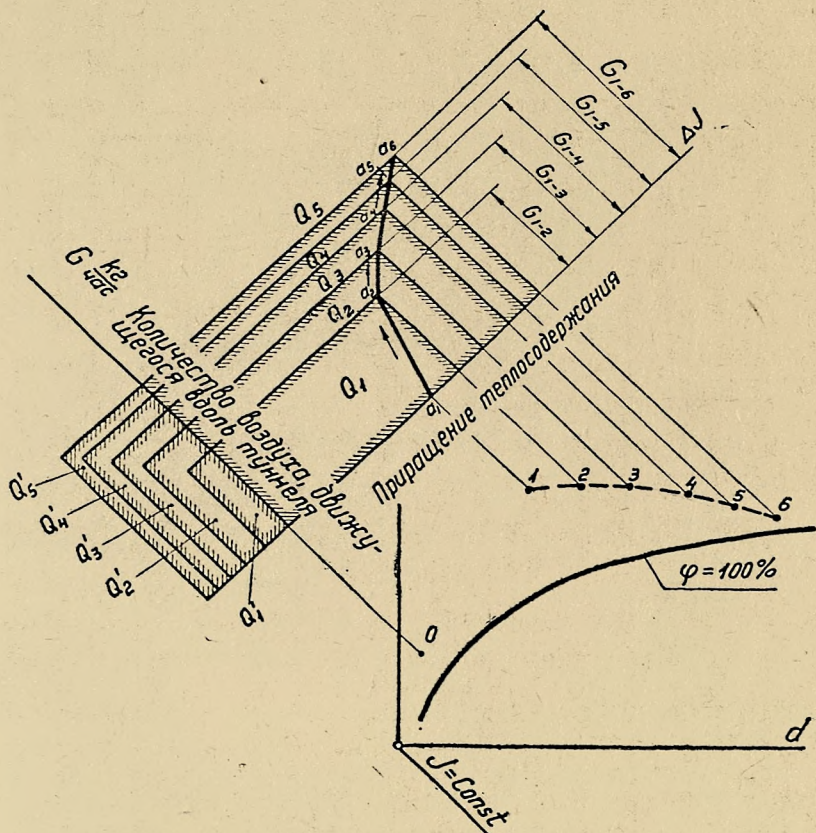
При этом если точки на $I-d$ -диаграмме отображают действительный процесс туннеля с учетом всех его тепловых потерь, то найденные расходы тепла и являются искомыми, и на основании полученных величин может быть произведен расчет приборов отопления туннеля. Однако расчет сушильного про-



Фиг. 13. Графическая связь количества тепла, воздуха и приращения к сушилу системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло.

цесса туннеля не всегда позволяет сразу определить в $I-d$ -диаграмме реальный процесс сушки, и дополнительные потери тепла приходится вводить после производства расчета сушильного процесса. В этом случае дополнительные потери удобно пристраивать согласно фиг. 14, где дополнительно к определенным расходам тепла в идеальном сушиле пристраиваются дополнительные прямоугольники, площади которых $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_6$ пропорциональны потерям на рассчитываемых участках туннеля.

Полученные величины расхода тепла перестраиваем по длине туннеля (фиг. 15). Нагревательные ребристые трубы в разбираемом туннеле расположены вдоль туннеля, поэтому в начале первой зоны (сечение 1—1) количество тепла, передаваемое в этом сечении, равно нулю. В конце первой зоны (сечение 2—2) количество передаваемого тепла будет равно Q_1 . Равномерная

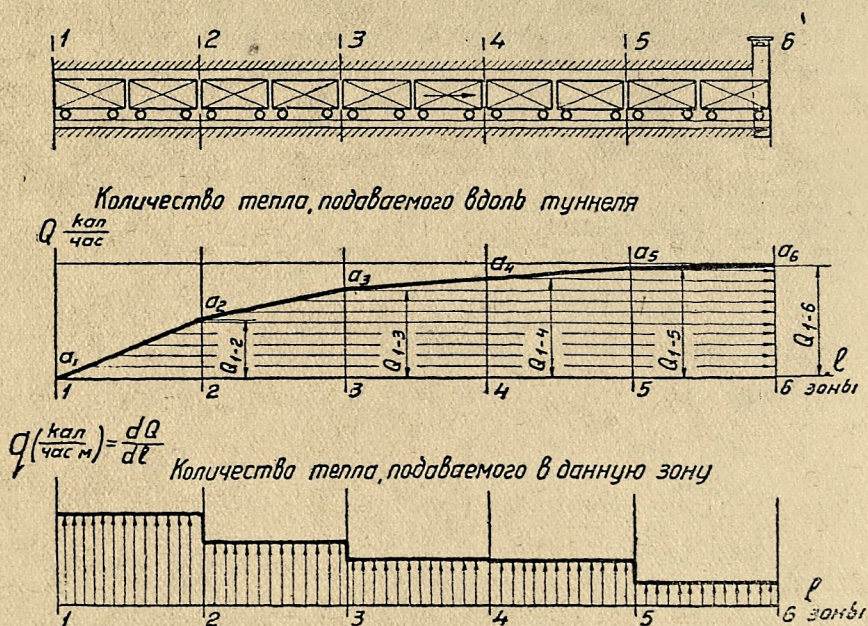


Фиг. 14. Потери тепла в туннеле на дополнительном построении в $I-d$ -диаграмме.

подача тепла в первую зону по всей ее длине отобразится на графике прямой $a_1 a_2$. Таким же образом перестраиваем расходы тепла в следующих зонах. В результате получаем ломаную линию потока тепла, передаваемого нагревательными приборами воздуху по длине туннеля.

Для определения необходимой поверхности нагрева в данной зоне строим дифференциальную кривую $\frac{dQ}{dl}$, которая определяет

интенсивность подачи тепла в данной зоне. Эта кривая, в данном случае имеющая вид ломаной изображена на фиг. 15.



Фиг. 15. Расход тепла по длине туннеля системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло и интенсивность подачи тепла в данную зону.

УДЕЛЬНЫЕ РАСХОДЫ ТЕПЛА И ВОЗДУХА В ТУННЕЛЬНОМ СУШИЛЕ

При расчете сушил весьма важно выбрать основные величины, характеризующие сушильный процесс. В камерных сушилках расчет ведется на 1 кг испаряемой влаги, так как в этом случае расход тепла и воздуха на сушку получается простым перемножением полученных удельных расходов на часовое количество испаряемой влаги.

В туннельном сушиле отдельные зоны характеризуются, с одной стороны, количеством испаряемой воды, с другой, — длиной зоны. Основной расчет сушильного процесса удобно вести на туннель длиной $l = 1$ м, испаряющий $W = 1$ кг влаги в час.

Для перехода от удельных расходов к действительным расходам тепла и воздуха, необходимо разобрать, как будет изменяться интенсивность испарения туннельного сушила в зависимости от его длины, при прочих равных условиях.

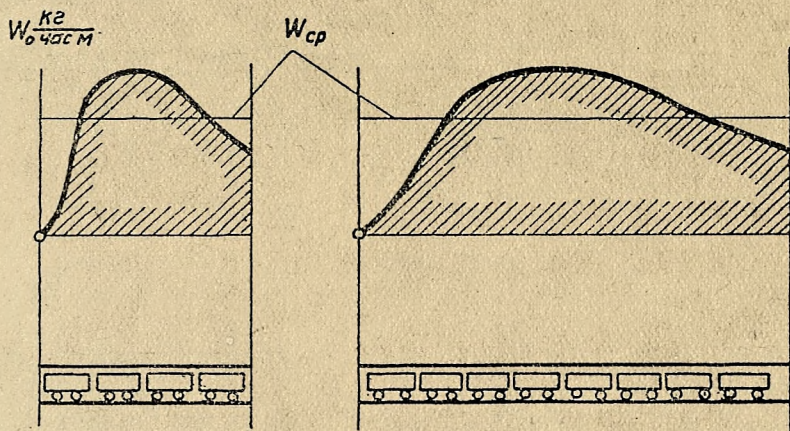
Обозначим:

W — количество испаряемой влаги со всего туннеля (кг/час),

l — длина туннеля (м),

$W_{cp} = \frac{W}{l}$ — средняя интенсивность испарения 1 пог. м туннеля
(кг/час),
 W_0 — истинная интенсивность испарения 1 пог. м туннеля
(кг/час).

При заданном режиме сушки в одном и том же поперечном сечении туннеля количество испаряемой влаги пропорционально его длине. Следовательно, при изменении длины равнорежимного туннеля величина W_{cp} остается постоянной.



Фиг. 16. Изменение интенсивности испарения по длине двух-туннельной разной длины, но с равным тепловым режимом.

На фиг. 16 изображены два туннеля одинакового сечения, работающие с одним и тем же тепловым режимом, но разной длины (один в два раза длиннее другого), и представлено схематическое распределение в них интенсивности испарения влаги W_0 .

На основании изложенного значения W_{cp} обоих туннелей будут одинаковыми, и распределение W_0 по длине туннеля представляет одну и ту же кривую, но построенную в разных масштабах по горизонтали. Так же расходы тепла и свежего воздуха на 1 пог. м сушила в случае равнорежимных туннелей разной длины. Таким образом переход от найденных удельных расходов тепла и воздуха на сушку к действительным расходам на туннель или отдельную его зону не составит трудностей.

Произведенный выше разбор отдельных элементов рабочего процесса туннельных сушил охватывает наиболее общие случаи расчета туннелей и далеко не исчерпывает множества частных случаев. Однако при помощи приведенного метода последние могут быть разобраны также просто и наглядно.

СУШИЛО НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ДЕРЕВА СИСТЕМЫ ПРОФ. В. Е. ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Все сушила можно подразделить на две основные группы: 1) сушила периодического действия и 2) сушила непрерывного действия.

Сушила периодического действия характеризуются тем, что материал за весь период сушки не перемещается. Около материала циркулирует воздух, количества и параметры которого изменяются в процессе сушки в зависимости от влажности материала.

Анализ работы сушил периодического действия показывает, что в начале сушки, когда материал весьма легко отдает свою влагу, воздух уходит из сушила при высоком насыщении влагой; чем более досыхает материал, тем труднее он отдает свою влагу, так как теплопроводность сухого дерева и парциальное давление паров воды на его поверхности уменьшается. Для испарения влаги в последний период сушки требуется воздух более высокой температуры и более низких насыщений. Это создает необходимость в конце сушки выбрасывать из камеры сухой, малоотработанный воздух, что в конечном итоге снижает экономичность сушила. Таким образом экономичность сушила периодического действия зависит от конечной влажности материала, подвергаемого сушке.

Сушила периодического действия строятся сравнительно небольших емкостей (10—40 м³ древесины) для случаев, когда приходится сушить весьма разнородный по размерам, породе и влажности материал, при относительно небольших его количествах. В этом случае приходится мириться с некоторым понижением экономичности сушила, использовав весьма хорошее качество сушил периодического действия, — гибкость их управления и, следовательно, возможность весьма быстро установить у материала нужный режим сушки.

В сушилах *непрерывного* действия дерево загружается в сушило с так называемого влажного конца, продвигается через

разные его зоны и выгружается в противоположном конце туннеля. По пути материал омывается воздухом, который циркулирует последовательно через зоны сушила и выбрасывается наружу в том месте, где он наиболее насыщен влагой, причем параметры отработанного воздуха в сушилах непрерывного действия остаются неизменными в процессе сушки. Это определяет постоянную в процессе сушки экономичность сушила непрерывного действия, которая в грамотно сконструированном туннеле всегда выше, чем в сушилах периодического действия.

В туннельном сушале мы имеем два потока: с одной стороны поток материала, влажность которого по мере движения вдоль сушила уменьшается, и с другой стороны — поток воздуха. Их состояния (температура и влажность) взаимно связаны и изменяются по длине туннеля. Конструируя туннельные сушила, необходимо учитывать эту связь, допуская вдоль данной зоны туннеля такие изменения параметров воздуха, чтобы штабель, расположенный в этой зоне, высыхал во всех своих точках с допустимой равномерностью. В случае сушил для дерева по длине туннеля должны установиться перепады температуры в пределах $15-20^{\circ}$, что диктуется режимами сушки дерева. Для достижения таких перепадов температур вдоль туннеля при допустимых перепадах температуры около одного штабеля $\Delta t = 2 \div 5^{\circ}$ необходимо строить туннели соответствующей длины (длиной $40-60$ м, емкостью $150-200$ м³ древесины).

Таким образом в туннельных сушилах всегда сосредоточены большие массы материала. Это в свою очередь создает большую инерцию теплового режима туннельного сушила, чем и объясняется их меньшая гибкость в управлении по сравнению с сушилами периодического действия, но зато в отрегулированном туннельном сушале распределение температур и влажностей воздуха в различных зонах туннеля при постоянной подаче однородного материала будет весьма постоянным. Поэтому раз отрегулированное туннельное сушило почти не требует повседневной регулировки, что сильно упрощает его обслуживание по сравнению с камерными сушилами.

Для бесперебойной работы туннельного сушила, как указано, требуются большие количества однородного как по размерам, так и по породе материала, что и определяет область их применения.

ОСНОВЫ КОНСТРУКЦИИ

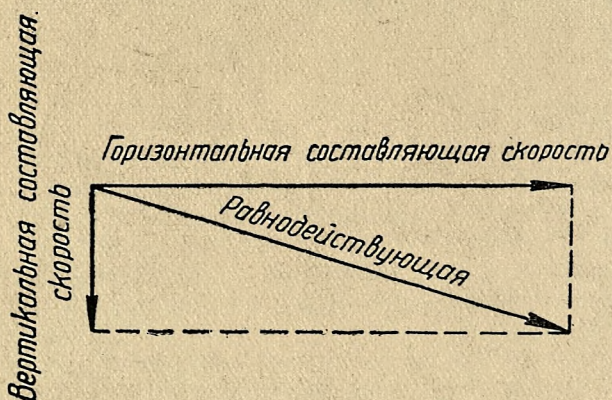
Сушила непрерывного действия для дерева системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло (фиг. 1), так же как и аналогичные сушила периодического действия, основаны на принципах естественной циркуляции воздуха.

В туннеле этой системы воздух имеет винтообразное движение, которое составляется из двух потоков: 1) поток воздуха вдоль туннеля направлен противотоком по отношению к мате-

риалу и 2) в поперечном сечении созданы условия для возникновения многократной циркуляции воздуха у материала.

Поток воздуха вдоль туннеля возникает под действием разрежения, создаваемого отводящей трубой, расположенной во влажном конце туннеля. Труба соединяется с сушилом через отверстие, расположенное у пола самой влажной зоны туннеля, благодаря чему воздух в трубе уходит наиболее насыщенным влагой и охлажденным. Это условие определяет высокую экономичность противоточных сушил.

Многократная циркуляция в поперечных сечениях туннеля возникает под влиянием гидростатического напора, создаваемого разностью весов нисходящего потока воздуха у материала и восходящих потоков нагретого воздуха над приборами отопления, которые расположены под свободными прозорами между штабелями и стенами сушила.



Фиг. 2. Схема сложения скоростей воздуха в противоточном туннеле.

В противоточных туннелях неизбежно возникает расслоение воздуха, т. е. в данном сечении туннеля воздух расслаивается на разных горизонтах согласно своему удельному весу. В верхних слоях располагается самый легкий, нагретый, воздух, и у пола наиболее охлажденный, тяжелый. Это расслоение является результатом наличия у материала нисходящих потоков воздуха вследствие его утяжеления в процессе сушки.

Таким образом наряду с горизонтальной скоростью воздуха у материала в чистом противоточном туннеле неизбежна также вертикальная составляющая скорость, направленная к полу сушила. Схематически эти скорости могут быть представлены на схеме фиг. 2. В результате их сложения равнодействующая по величине и по направлению будет выражаться диагональю параллелограмма, построенного на отрезках этих составляющих скоростей. Вертикальная составляющая скорость, возникающая вследствие утяжеления воздуха в процессе сушки, будет тем больше, чем выше загрузка сушимого материала. Это положение очевидно из гидравлической теории движения газов.

Таким образом одним из методов для уменьшения расслаивания воздуха в противоточных туннелях является уменьшение

Высоты сушила. По этому пути идет американская практика сушки грубой керамики в противоточных туннелях незначительной высоты. В туннельных сушилах для дерева, где конструктор связан определенной высотой штабеля, для парализования расслаивания необходимо искать других путей.

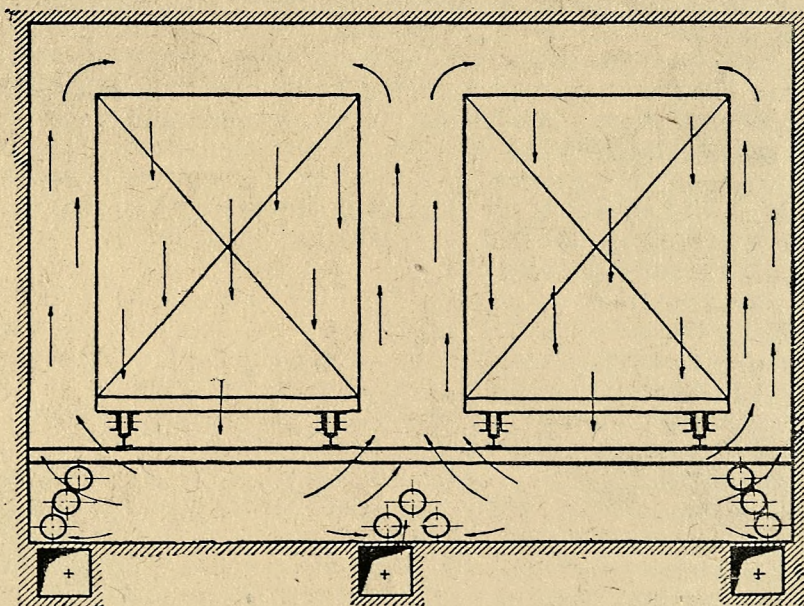
Рассмотрение схемы сложения скоростей показывает, что чем больше горизонтальная составляющая скорость (скорость потока воздуха вдоль туннеля) относительно вертикальной составляющей, тем ближе к горизонтальной скорости будет располагаться равнодействующая, следовательно, тем меньшее влияние будет оказывать расслаивание воздуха у материалов. При горизонтальной скорости $v = 2 - 2,5$ м/сек расслаивание практически незаметно. Таким образом увеличение скорости вдоль противоточного туннеля является вторым методом борьбы с расслаиванием воздуха у материала.

Не всегда удается осуществить у материала большие скорости воздуха. При сушке дерева, где требуются сравнительно небольшие удельные расходы воздуха на сушку, для осуществления таких скоростей потребовался бы туннель очень большой длины (свыше 100 м), что уже выходит за пределы экономической и технической целесообразности.

В туннельном сушиле системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло борьба с расслаиванием воздуха осуществляется путем организованной многократной естественной циркуляции воздуха в поперечных сечениях (фиг. 3). В этом случае охлаждаемому и падающему на пол воздуху дается возможность нагреться о ребристые трубы и снова подняться вверх. Организованная таким образом циркуляция выравнивает температуру воздуха по высоте данной зоны туннеля, чем в конечном итоге создаются условия равномерной сушки материала во всем его объеме.

Кроме расслаивания в противоточном туннеле при малых скоростях воздуха имеет место продольная циркуляция воздуха (фиг. 4). Последняя образуется вследствие наличия гидростатического напора, создаваемого разностью весов двух столбов воздуха — восходящего в сухом конце туннеля и нисходящего во влажном его конце. На этом принципе работают американские туннельные сушила для дерева типа „National“ (фиг. 10, стр. 44) и „Moore“. Если не воспрепятствовать этой циркуляции, то под материалом образуется поток охлажденного воздуха из влажной зоны туннеля в сторону выгрузки материала, и над материалом возникнет поток горячего воздуха из сухой зоны туннеля в сторону его загрузки. Эти потоки, с одной стороны, будут стремиться выравнять температуру по длине туннеля, с другой, — создадут неодинаковые условия сушки вверху и внизу туннеля. Оба эти условия являются весьма вредными для туннельных сушил, и поэтому продольная циркуляция должна быть парализована. Для этого рассматриваемые сушила разделены на отдельные зоны перегородками, которые должны препятствовать этой циркуляции.

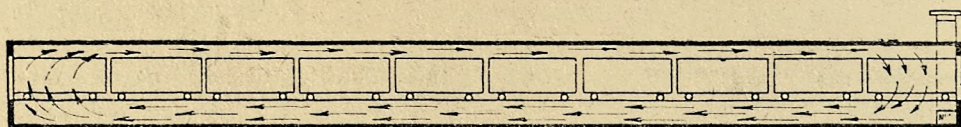
В качестве источника тепла в туннеле устанавливаются паровые ребристые трубы, отдельные секции которых снабжены самостоятельной подводкой. Это дает возможность регулировки каждой отдельной зоны туннеля. Свежий воздух поступает в тун-



Фиг. 3. Многократная естественная циркуляция воздуха в поперечных сечениях туннеля.

нель со стороны сухого конца через отверстия приточных каналов в две отдельные зоны со стороны сухого конца туннеля. Делая приточные каналы разной длины, мы имеем возможность подавать воздух в различные зоны туннеля в разных количествах.

Таким образом в сушиле для дерева непрерывного действия системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло осуществлены следующие основные принципы.



Фиг. 4. Продольная циркуляция воздуха в туннеле без перегородок.

Первый принцип. В туннеле осуществлен противоток с переменным расходом тепла и воздуха по длине туннеля.

Второй принцип. Около материала осуществлена многократная циркуляция воздуха, которая выравнивает температуру

воздуха по высоте данной зоны туннеля, парализует вредное расслаивание воздуха и вместе с продольным потоком образует винтовое движение воздуха вдоль туннеля. Многократная циркуляция в поперечном сечении данной зоны туннеля может быть рассчитана по формулам, составленным инж. Г. П. Иванцовым (см. статью „Расчет естественной циркуляции в сушила многократного насыщения“).

Третий принцип. Сушка материала протекает в нисходящем потоке воздуха, что создает условия для саморегулирования процесса сушки.

Четвертый принцип. Отбор отработанного воздуха осуществлен с пола самой влажной зоны туннеля, где воздух наиболее охлажден и насыщен влагой, что определяет высокую экономичность сушила.

Для массовой сушки однородной древесины тепловым отделом Стальпроекта разработан ряд сушил непрерывного действия системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло.

Осуществленное на заводе „Красный Профинтерн“ в Бежице по проекту теплового отдела Стальпроекта переоборудование типового сушила Некар¹ выявило ряд преимуществ непрерывно действующих сушил системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло (фиг. 5) перед сушилами типа „National“.

В частности, в переоборудованном туннеле удается сушить более толстый материал благодаря более гибкой регулировке теплового режима по длине туннеля по сравнению с сушилом „National“².

До настоящего времени еще не произведено подробных испытаний переоборудованного в Бежице сушила, однако, грамотное расположение приборов отопления и системы вентиляции заставляет ожидать от него лучших показателей работы в сравнении с сушилами „National“ как в отношении равномерности сушки, так и с точки зрения экономичности.

На этом заканчиваем описание конструкции сушила непрерывного действия системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло и переходим к тепловому расчету туннеля.

РАСЧЕТ ТУННЕЛЬНОГО СУШИЛА³ ДЛИНОЙ 1 м

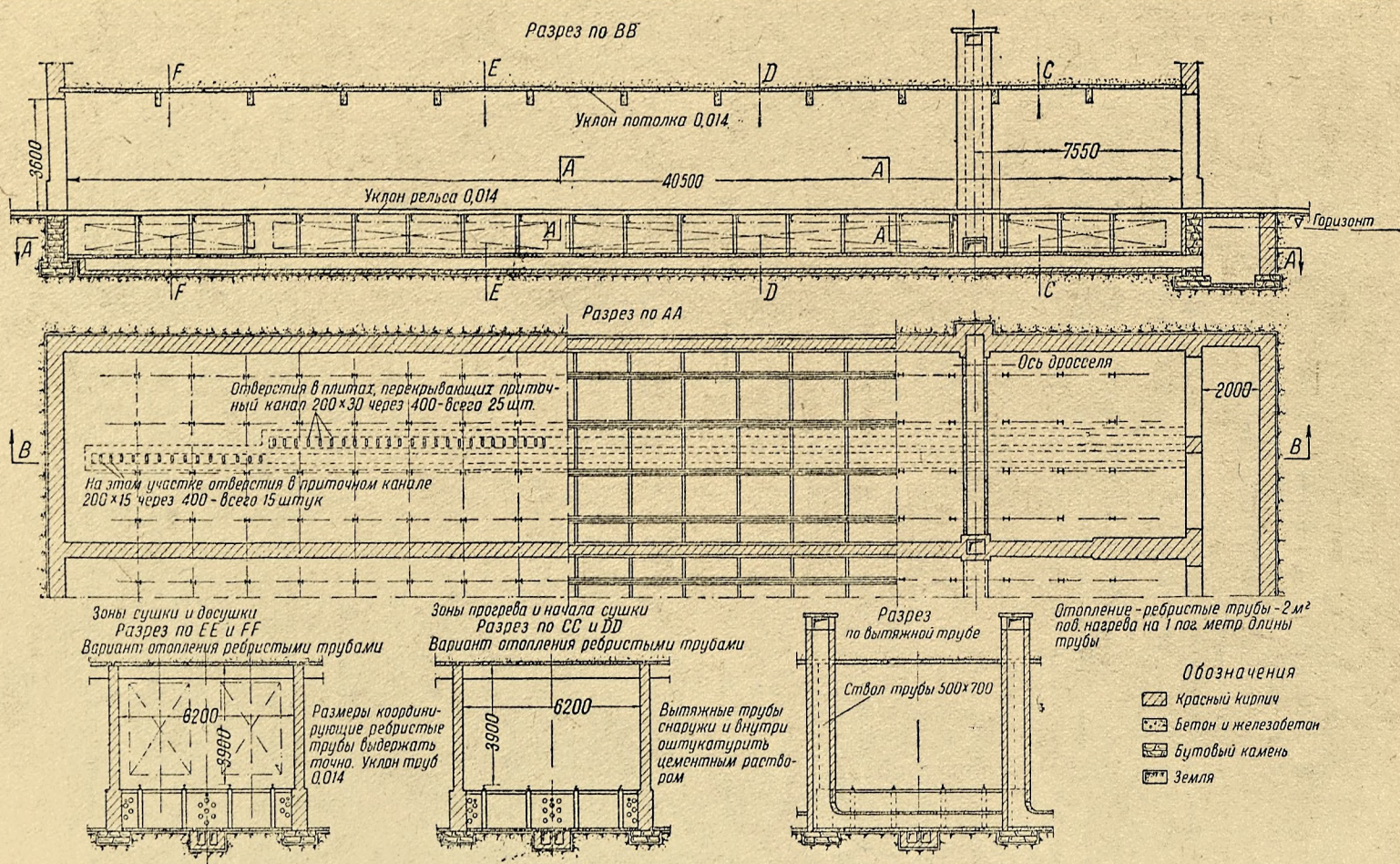
Задание

Сушимый материал сосна толщиной 25 мм, начальная влажность дерева 70%, конечная влажность дерева 18%.

¹ Альбом стандартных лесосушек (Древстрой), изд. ГТИ, 1930.

² Трудность регулирования режима сушил типа „National“ отмечается также в результатах исследования сушил этой системы Центральным научно-исследовательским институтом древесины (1930—1931 гг.). Эти результаты опубликованы в книге В. И. Малеева и В. Г. Белопольского „Искусственная сушка дерева“, изд. Гослестехиздата, Москва, стр. 93, 1933.

³ См. статью „Элементы рабочего процесса туннельных сушил“, стр. 126.



Фиг. 5. Проект переоборудования туннельного сушила Пекар („National“) на сушило системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло.

Режим сушки, по данным медиссоновской лаборатории, принимаем 00—II (представлен в табл. 1).

Таблица 1

Влажность дерева %	Температура воз- духа °C	Относительная влажность воз- духа φ %
> 35	71	85
35	77	60
16	82	30

Для иллюстрации приводимого ниже расчета принимаем, что интенсивность испарения влаги по длине туннеля является величиной постоянной. Прогрев материала совершается на $\frac{1}{6}$ длины туннеля.

Расчет сушильного процесса

Расчет ведем на туннель длиной 1 м, испаряющий 1 кг влаги в час.

Делим туннель на три участка, порядок которых совпадает с направлением движения воздуха. Падение влажности по участкам распределяется следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

Участки (по ходу воздуха)	Падение влаж- ности материала %	Количество испа- ряемой влаги на участке %
I	с 35 до 18	17
II	„ 70 „ 35	35
III	прогрев материала	—
Со всего тун- неля	с 70 до 18	52

Итак в туннеле из материала испаряется 52% влаги. В долях 1 кг влаги это составит по участкам (табл. 2).

Таблица 3

Участки по ходу воздуха	Количество влаги, испаряемой в час кг	Количество влаги, проносимое воздухом вдоль туннеля, на 1 кг испаряемой влаги кг
I	$\frac{17}{52} = 0,327$	0,327
II	$\frac{35}{52} = 0,673$	1,000
III	—	—

Со всего туннеля 1,000 кг/кг испаряемой влаги. В той же таблице дано количество влаги, проносимое воздухом вдоль туннеля.

Определение удельных расходов воздуха

Заданный режим сушки распределяем по участкам и получаем следующие условия для расчета, которые сведены в табл. 4.

Таблица 4

Границы участков	Температура °С	Относительная влажность φ %	d г/кг абс. сух. возд.	I Кал/кг абс. сух. воздуха
I — II	77	60	215	154
II — III	71	85	230	161

Влагосодержание и теплосодержание свежего воздуха на 1 кг абсолютно сухого воздуха

$$d_0 = 10 \text{ г} \quad I_0 = 10 \text{ Кал}$$

На основании количеств испаряемой влаги по длине туннеля и приращения влагосодержания производим построение, данное на фиг. 6.

Количество воздуха, движущегося на границе участков I—II, равное количеству воздуха, поданного на участке I, будет

$$G_1 = \frac{W_{1-2} \cdot 1000}{d_2 - d_0} = \frac{0,327 \cdot 1000}{215 - 10} = 1,60 \text{ кг/час}$$

Откладываем в масштабе эту величину по оси ординат рассматриваемого построения. Заштрихованная площадь прямоугольника $abce$, пропорциональная W_{1-2} — количеству испаряемой влаги на участке 1—2.

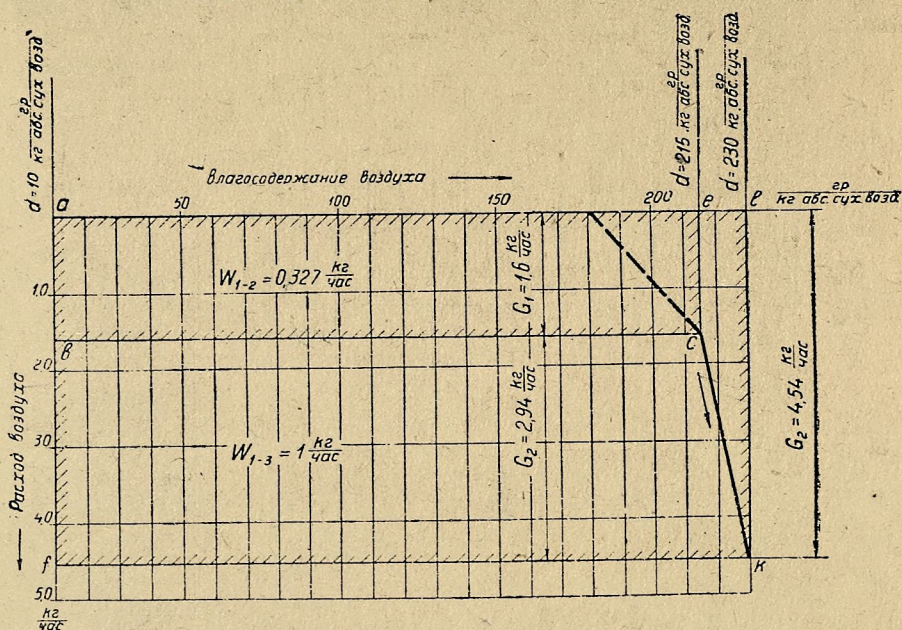
Так как состояние воздуха в начале I участка (у двери туннеля) не задано, то для наглядности показываем поток воздуха вдоль участка I пунктиром.

Количество воздуха, движущееся на границе участков II—III будет:

$$G_2 = \frac{W_{1-3} \cdot 1000}{d_3 - d_0} = \frac{1,0 \cdot 1000}{230 - 10} = \frac{1000}{220} = 4,54 \text{ кг/час}$$

Количество воздуха, поданное на втором участке, будет

$$G_2 - G_1 = 4,54 - 1,6 = 2,94 \text{ кг/час}$$



Фиг. 6. Графическое определение количества воздуха, необходимого на сушку в разные участки туннеля.

На нашем построении количество влаги, испаряемое на длине туннеля 1—2 изображается заштрихованной площадью прямоугольника *afkl*.

Определение удельных расходов тепла по участкам

Количество тепла, потребное для сушки на участке 1—2 будет

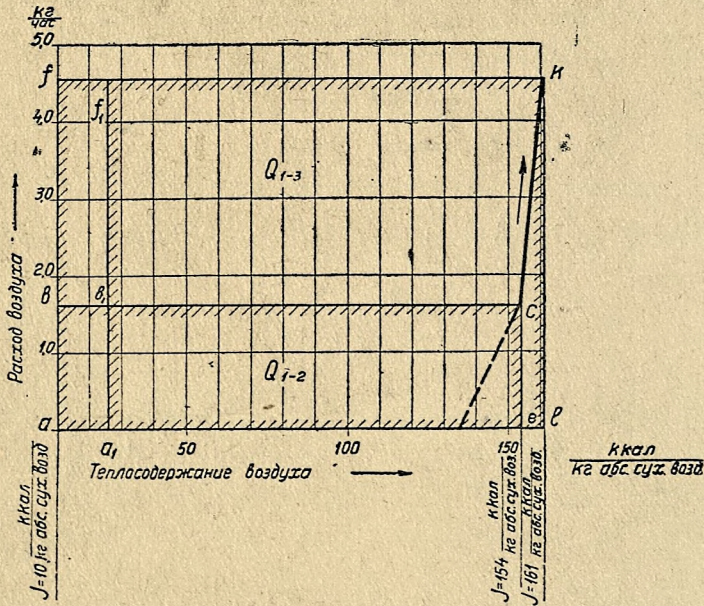
$$Q_{1-2} = G_1 (I_1 - I_0) - W_{1-2} \cdot \vartheta = 1,6 (154 - 10) - 0,327 \cdot 77 = 205,8,$$

где W_{1-2} — количество влаги, испаряемой на участке 1—2.

ϑ — температура материала, которая на первом участке, где материал досыхает, близка к температуре сухого термометра; на втором участке, пока материал еще не доведен до точки

насыщения волокна, его температура близка к температуре влажного термометра психрометра.

Графическое изображение этого процесса приведено на фиг. 7. Количество тепла, потребное на сушку в первом участке на диаграмме представлялось бы заштрихованным прямоугольником $abce$ в том случае, если влага, заключенная в материале, поступала в разбираемый участок при $\vartheta = 0^\circ$. Материал, поступающий в первый участок, уже нагрет в предыдущих зонах, вследствие чего количество тепла, потребное на сушку в первом участке, будет меньше и выразится площадью прямоугольника a_1b_1ce .



Фиг. 7. Графическое определение расходов тепла, потребных на сушку в разных участках туннеля.

Количество тепла, потребное на длине туннеля 1—3,

$$Q_{1-3} = 4,54 (161 - 10) - 1,0 \cdot 70 = 685 - 70 = 615 \text{ Кал/час.}$$

По аналогии с предыдущим описанием количество тепла изобразится разностью площадей прямоугольников $afkl - aff_1a_2$ и выразится площадью прямоугольника a_1f_1kl . Количество тепла, потребное для сушки во II участке: $615 - 205,8 = 409,2 \text{ Кал/час.}$

Количество прогреваемой на III участке древесины

$$\frac{1}{0,70 - 0,18} = \frac{1}{0,52} = 1,92 \text{ кг}$$

На 1 кг испаряемой из туннеля влаги количество прогреваемой в III участке влаги будет

$$\frac{1,0 \cdot 0,7}{0,70 - 0,48} = \frac{0,7}{0,22} = 3,18 \text{ кг}$$

Расход тепла на III участке на прогрев материала определяется:

$$Q = (1,34 \cdot 1 + 1,92 \cdot 0,40) 70 = (1,34 + 0,77) 70 = 148 \text{ Кал}$$

т.е. 1 кг испаряемой влаги в час.

Определение длины участков

Длину участков туннеля определяем графически (фиг. 8). На верхней диаграмме по оси абсцисс отложена длина туннеля в 1 м, по оси ординат W —количество влаги, испаряемое с 1 м длины туннеля в час (кг).

Среднее количество влаги, испаряемой из туннеля, равно 1 кг/м·час и выражается на диаграмме пунктирной прямой ab . Однако для осуществления этого необходимо, чтобы на длине 1,0 — 0,17 = 0,83 м туннеля, где происходит испарение (прогрев производится, как указано выше, на длине 0,17 м) среднее количество испаряемой влаги составляло $1 : 0,83 = 1,2 \text{ кг/м} \cdot \text{час}$.

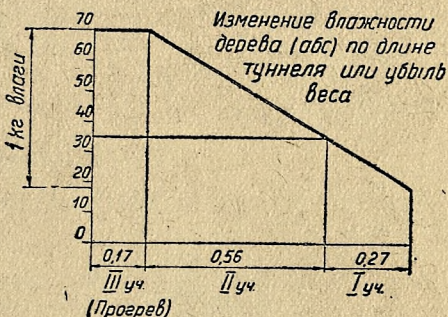
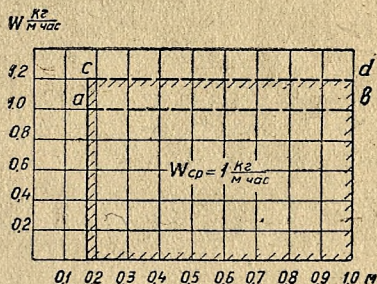
На диаграмме это изображено пунктирной прямой cd .

Интенсивность испарения по длине туннеля считаем, как было указано выше, равномерной. На нижней диаграмме той же фиг. 8 графическим интегрированием верхней кривой построена убыль веса штабеля или падение его абсолютной влажности по длине туннеля.

Выше мы распределили падение абсолютной влажности материала по участкам (табл. 2), и с помощью построенной на фиг. 8 кривой нетрудно определить длины участков, которые распределяются следующим образом.

Длина	I участка	0,27 м
"	II	"	0,56 "
"	III	"	0,17 "

Полная длина туннеля . . 1,00 м



Фиг. 8. Графическое определение длины участков.

Ниже даем табл. 5, которая содержит все данные, полученные при расче туннеля длиной 1 м и испаряющего 1 кг влаги в час.

Участок туннеля	Количество влаги, испа- ряемой в час кг	Длина участка м	Расход воздуха кг/час	Расход тепла Кал/час
I	0,327	0,27	1,60	205,8
II	0,673	0,56	2,94	409,2
III	—	0,17	—	148,0
Всего	1,000	1,00	4,54	763,0

На этом заканчиваем расчет туннеля длиной 1 м и переходим к расчету двухколейного туннеля длиной 53 м, который изображен на фиг. 1.

РАСЧЕТ ДВУХКОЛЕЙНОГО ТУННЕЛЯ ДЛИНОЙ 53 м

Задание

Сушка соснового 25-миллиметрового теса с 70% абс. влажности до 18% абс. влажности: вместимость туннеля 16 штабелей длиной 6,4 м, шириной 2 м и высотой 2,5 м; срок сушки 3 суток (72 часа).

Тепловой расчет

Количество древесины, заключенное в одном штабеле, составляет:

$$\frac{2,5 \cdot 0,025}{0,025 + 0,025} \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 6,4 = 11,2 \text{ м}^3$$

Емкость туннеля:

$$11,2 \cdot 16 = 179 \text{ м}^3 \text{ древесины}$$

Производительность

$$\frac{179}{72} = 2,49 \text{ м}^3 \text{ в час} = 59,6 \text{ м}^3 \text{ в сутки}$$

Испаряется воды из 1 м³ древесины

$$430 (0,70 - 0,18) = 430 \cdot 0,52 = 224 \text{ кг}$$

Испаряется воды в час с 1 пог. м

$$W = 224 \cdot 2,49 = 557 \text{ кг}$$

$$W = \frac{557}{53 \cdot 0,83} = 12,7 \text{ кг}$$

Отдача тепла ограждениями I пог. м туннеля

Перекрытие $F_1 = 5,8 \text{ м}^2$,

$$a_b = 7,5; \quad a_n = 20 \text{ (ОСТ 6232)}$$

$$K = \frac{1 \cdot 1,5}{\frac{1}{7,5} + \frac{1}{20} + \frac{0,1}{1,33} + \frac{0,1}{0,39} + \frac{0,01}{0,15} + \frac{0,04}{0,93} + \frac{0,025}{0,15}} =$$

$$= \frac{1,5}{0,134 + 0,05 + 0,075 + 0,26 + 0,067 + 0,043 + 0,167} =$$

$$= \frac{1,5}{0,796} = 1,88 \text{ Кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}$$

$$\Delta t = 90 - (-30) = 120^\circ$$

$$q_1 = 1,88 \cdot 5,8 \cdot 120 = 1310 \text{ Кал/м}^2 \cdot \text{час}$$

Площадь стены $F_2 = 2 \cdot 3,55 = 7,10 \text{ м}^2$

$$K = \frac{1 \cdot 1,5}{\frac{1}{7,5} + \frac{1}{20} + \frac{0,51}{0,55} + \frac{0,02}{0,4}} =$$

$$= \frac{1,5}{0,134 + 0,05 + 0,93 + 0,05} =$$

$$= \frac{1,5}{1,164} = 1,29 \text{ Кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}$$

$$\Delta t = 90 - (-30) = 120^\circ$$

$$q_2 = 1,29 \cdot 7,1 \cdot 120 = 1100 \text{ Кал/час}$$

Полная отдача тепла ограждениями I пог. м туннеля

$$Q = 1310 + 1100 = 2410 \text{ Кал/час}$$

На основании данных табл. 5 составляем табл. 6 для туннеля длиной 53 м, испаряющего 557 кг влаги в час.

Расчет воздухопроводов

В I участок подается воздуха 770 м³ в час. При цементной штукатурке стенок канала цементным слоем 10 мм проектируемый канал имеет сечение 0,75 × 0,39 м, длиной 14 м.

Скорость в канале

$$\frac{770}{3600 \cdot 0,75 \cdot 0,39} = 0,73 \text{ м/сек}$$

Для распространения воздуха по участку проектируются отверстия размерами 0,1 × 0,05 м числом 28, с расстоянием между центрами отверстий 500 мм.

Скорость воздуха в отверстиях:

$$\frac{770}{3600 \cdot 0,1 \cdot 0,05 \cdot 28 \cdot 0,8} = 1,92 \text{ м/сек}$$

(0,8—коэффициент сужения струи).

Во II участок подается воздуха 1415 м³ в час. При цементной штукатурке стенок канала слоем 10 мм проектируется два канала для подвода воздуха размерами 0,40 × 0,39 м, длиной 43 м.

Таблица 6

Показатели	Единицы измерения	Участки по ходу воздуха			Весь туннель
		I	II	III	
Длина участков	<i>м</i>	$53 \cdot 0,27 = 14,3$	$53 \cdot 0,56 = 29,7$	$53 \cdot 0,17 = 9$	53
Испарение влаги на участке	<i>кг/час</i>	$557 \cdot 0,327 = 182,14$	$557 \cdot 0,673 = 374,86$	—	557
Расход воздуха на участок	<i>кг/час</i>	890	1 640	—	—
Расход воздуха в конце участка	<i>кг/час</i>	890	2 530	—	—
Расход тепла на сушку на участок	<i>Кал/час</i>	$205,8 \cdot 557 = 115\ 000$	$409,2 \cdot 557 = 228\ 000$	$148 \cdot 557 = 82\ 500$	—
Потеря тепла ограждениями на участок	<i>Кал/час</i>	$2\ 410 \cdot 14,3 = 34\ 500$	$2\ 410 \cdot 29,7 = 71\ 500$	$2\ 410 \cdot 9 = 21\ 700$	—
Полный расход тепла на участке	<i>Кал/час</i>	$115\ 000 + 34\ 500 = 149\ 500$	$228\ 000 + 71\ 500 = 299\ 500$	$82\ 500 + 21\ 700 = 104\ 200$	553 200
Поверхность нагрева на участок (см. примечание I)	<i>м²</i>	$149\ 500 : 470 = 317$	$299\ 500 : 470 = 636$	$104\ 200 : 470 = 222$	1 175
Объем приточного воздуха ($\gamma = 1,17$ кг/м ³) на участок	<i>м³/час</i>	$(890 \cdot 1,01) : 1,17 = 770$	$(1\ 640 \cdot 1,01) : 1,17 = 1\ 415$	—	—
Объем обработанного воздуха ($\gamma = 0,91$ кг/м ³)	—	—	$(2\ 530 \cdot 1,23) : 0,91 = 3\ 420$	—	—

Примечание I. При подсчете поверхности нагрева принято:

1. Давление пара в отопительных приборах 4 ат по манометру.

2. Средняя температура воздуха у ребристой трубы 75°, теплоотдача отопительных приборов 470 Кал/м²·час по нормали (фиг. 3, стр. 112).

Примечание II. Конструктивное размещение поверхности нагрева:

I участок 14,3 м $F = 317$ м²

13 линий на длине 12 м $2 \cdot 12 \cdot 13 = 312$ м²

II участок 29,7 м $F = 636$ м²

15 линий на длине 28 м $2 \cdot 28 \cdot 15 = 840$ м²

III участок 9 м $F = 222$ м²

15 линий по длине 7 м $2 \cdot 7 \cdot 15 = 210$ м²

Поверхность нагрева II участка увеличена против полученной расчетом, для того чтобы в случае неравномерной интенсивности испарения в процессе сушки, а именно увеличения интенсивности испарения в начале сушки, в запроектированном туннеле можно было сушить, не увеличивая срока сушки.

Скорость воздуха в подводящем канале

$$\frac{1415}{2 \cdot 3600 \cdot 0,40 \cdot 0,39} = 1,26 \text{ м/сек}$$

Отверстий в каждом канале 58 размерами $0,08 \times 0,02$ м с расстоянием между центрами 500 мм.

Скорость воздуха в отверстиях

$$\frac{1415}{2 \cdot 3600 \cdot 0,08 \cdot 0,02 \cdot 58} = 2,12 \text{ м/сек}$$

Объем удаляемого воздуха 3420 м³/час.

Ввиду возможности подсоса воздуха через неплотности дверей принимаем при расчете отводящих устройств полуторное количество воздуха:

$$3420 \cdot 1,5 = 5125 \text{ м}^3/\text{час}$$

При цементной штукатурке внутренней поверхности труб слоем 10 мм проектируем сечение трубы размерами $0,99 \times 0,49$ м

Скорость воздуха в трубе:

$$\frac{5125}{3600 \cdot 0,49 \cdot 0,99} = 2,94 \text{ м/сек}$$

Сопротивление вентиляционной системы сушила:

Канал I участка

$$\delta = \frac{1,17}{2g} (1,5 \cdot 0,73^2 + 1,92^2) = 0,267 \text{ мм вод. ст.}$$

Канал II участка

$$\delta = \frac{1,17}{2g} (1,5 \cdot 1,26^2 + 2,12^2) = \frac{1,17 \cdot 6,88}{19,62} = 0,41 \text{ мм вод. ст.}$$

Отводящая труба:

$$\delta = \frac{0,91}{2g} \cdot 3 \cdot 2,94^2 = 1,2 \text{ мм вод. ст.}$$

Полное сопротивление системы вентиляции туннеля будет

$$0,41 + 1,2 = 1,61 \text{ мм вод. ст.}$$

Разрежение, создаваемое 1 пог. м отводящей трубы, составляет при наружной температуре воздуха 25° и относительной влажности 60%:

$$1,153 - 0,91 = 0,243 \text{ мм вод. ст. на 1 м высоты трубы.}$$

Высота трубы 8 м создает разрежение $0,243 \cdot 8 = 1,94$ мм вод. ст., с избытком покрывающее сопротивление системы.

ИНЖЕКЦИОННОЕ СУШИЛО ДЛЯ ДЕРЕВА

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Стремление конструкторской мысли последнего времени направлено на создание конструкции сушила для дерева с непосредственным вводом в камеру топочных газов.

Задача применения в качестве агента сушки смеси дымовых газов и воздуха наиболее удобно разрешается в конструкции инжекционного сушила¹. В последней циркуляция воздуха внутри камеры вызывается живой силой струй воздуха (или смеси его с дымовыми газами), выходящих из приточных отверстий—инжекторов с большими скоростями.

Главной областью применения сушил для дерева инжекционного типа будет сушка с непосредственным вводом продуктов горения в камеру.

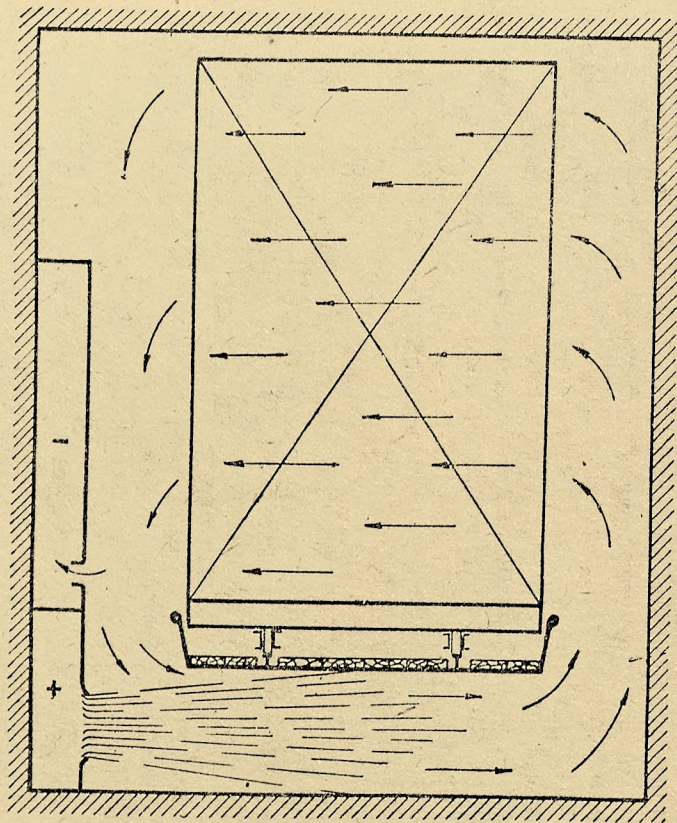
Второй, но значительно меньшей областью применения инжекционных сушил для дерева является случай сушки особо широких досок ответственного материала в условиях горизонтальной штабелевки. В этом случае направление циркулирующего воздуха должно быть также горизонтальным, что легко достигается в инжекционных сушилах с нижним горизонтальным расположением инжекторов (фиг. 1).

Широкую область применения инжекционные сушила имеют в других областях сушки, когда интенсивность испарения влаги с поверхности не может быть достигнута при естественной циркуляции воздуха.

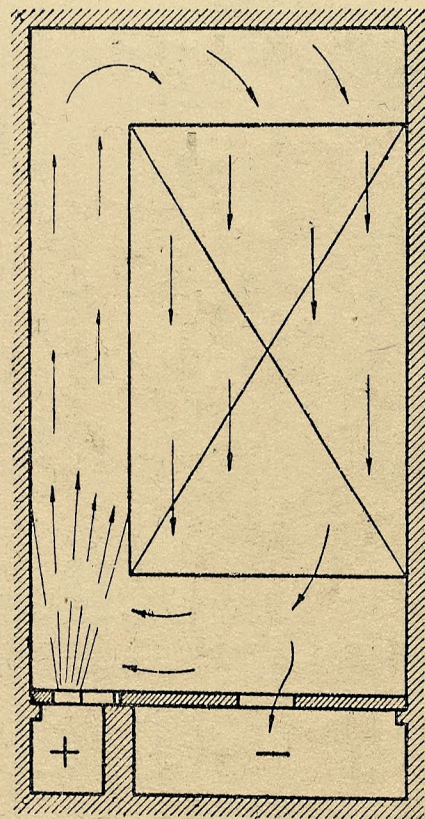
ОСНОВЫ КОНСТРУКЦИИ

При проектировании инжекционных сушил, сконструированных на принципе гидродинамики, в особенности при небольших скоростях воздуха у материала, необходимо учитывать законы гидростатики, доминирующие в сушилах с естественным движением воздуха. Отсюда вытекают две основные схемы инжекционных сушил. В первой схеме, получившей широкое распространение в сушилах огнеупорной промышленности, осуществлена сушка

¹ См. статью „Сушка дерева в продуктах горения“, стр. 206.



Фиг. 1. Правильная схема инжекционного сушила с горизонтальной циркуляцией воздуха у материала.



Фиг. 2. Правильная схема инжекционного сушила с нисходящим потоком воздуха у материала.

материала в нисходящем потоке (фиг. 2). Горячий воздух со скоростями 20—30 м/сек поступает через отверстия инжектора приточного канала, расположенного под свободным вертикальным проходом сбоку материала, подвергаемого сушке. Нетрудно убедиться, что в этой схеме помимо гидродинамического принципа целиком остается принцип естественного стремления горячего воздуха, более легкого, подниматься вверх и охлажденного, отяжелевшего, — опускаться у материала вниз. Таким образом в пределе, когда скорость воздуха в приточных отверстиях приближается к 0,5—2 м/сек, эти сушилка могут работать по законам чистого естественного движения воздуха. В случае же когда в инжекторах осуществляются скорости, превышающие 2 м/сек и увеличивается влияние принципа гидродинамики, обе причины, вызывающие циркуляцию воздуха, складываются в одном направлении, в результате чего последняя усиливается.

Во второй схеме (фиг. 1) сушка материала протекает в горизонтальном потоке воздуха. В этой схеме инжекторы, нагнетающие горячий воздух, расположены горизонтально и направлены в свободный проход под штабелем, где происходит смешение свежего вдуваемого воздуха с отработанным.

Полученная смесь воздуха двух состояний поступает в вертикальный свободный проход, распределяется по штабелю и по свободному проходу с другой стороны штабеля направляется большей своей частью в область смешения; меньшая часть отработанного воздуха, равная количеству поданного через инжектор, направляется в вентиляционную систему сушилка. Естественно, что в проходе, куда направлен теплый воздух, вес столба этого воздуха будет всегда меньше веса столба обработанного, охлажденного и отяжелевшего воздуха; таким образом в этой схеме сушилка силы, побуждающие естественную и принудительную циркуляцию, также направлены в одну сторону и не противоречат друг другу.

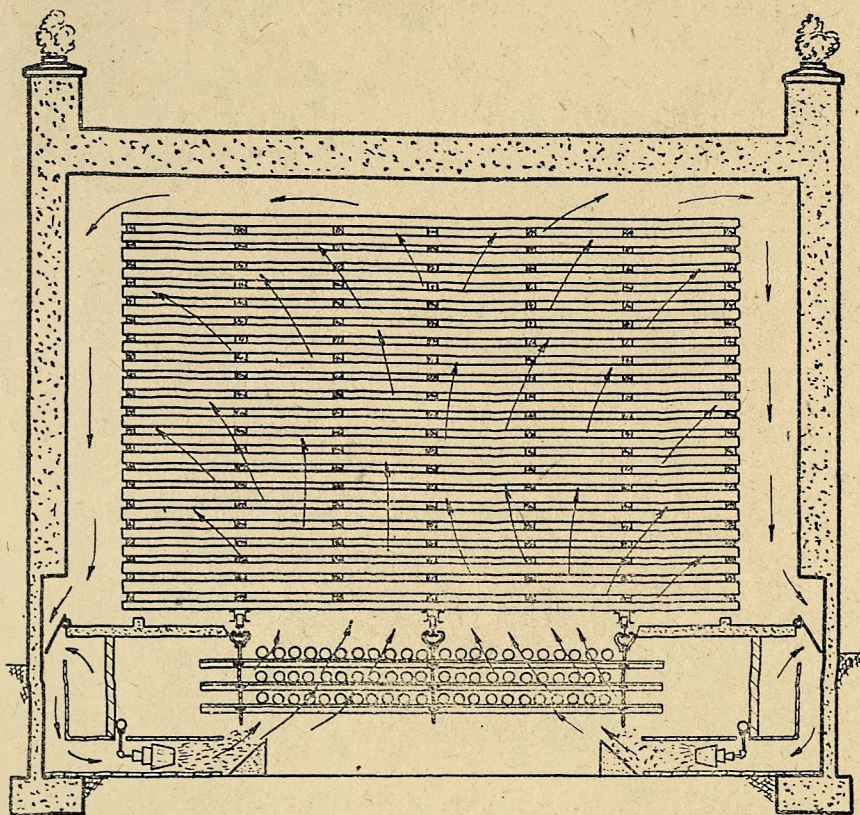
В качестве примеров неправильной конструкции инжекционных сушилок могут служить следующие две системы.

В сушилке Henderson Drying Equipment Co (фиг. 3) инжекторы и нагревательные приборы расположены вопреки законам гидравлической теории, так как сушка материала по схеме должна протекать в восходящем потоке. Получить равномерные условия сушки в сушилках этой системы невозможно. Очевидно, для некоторого улучшения качества сушки фирма Henderson рекомендует специальную штабелевку материала со средним продухом, которая, однако, основную схему сушилка не меняет.

Вторым примером неправильной схемы инжекционного сушилка является сушилка фирмы Carrier (фиг. 4) с верхними инжекторами. Здесь тепломому воздуху, вопреки силам естественного движения, дано нисходящее направление, охлажденный же воздух с другой стороны штабеля должен двигаться вверх. Таким образом в этой схеме сушилка инжекторы, преодолевающие сопротивление циркуляционной системы, должны дополнительно урав-

новешивать гидростатический напор, создаваемый столбами различно нагретого воздуха. Эта система сушил может работать в тех случаях, когда принудительное движение воздуха безусловно превалирует над естественным.

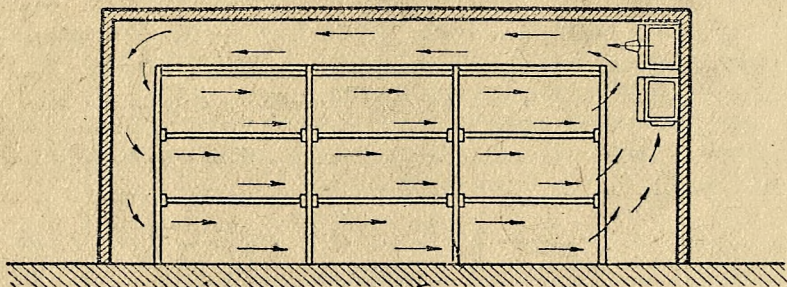
Разбор отдельных конструктивных элементов правильно сконструированных инжекционных сушил начинаем с зоны смешения, куда направлены инжекторы.



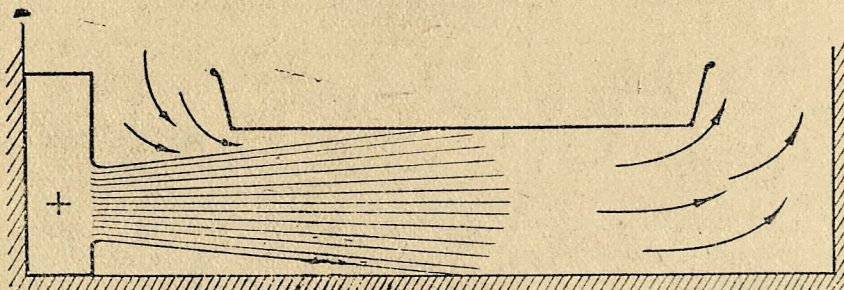
Фиг. 3. Неправильная схема инжекционного сушила.

Теория инжекции применительно к сушилам показывает, что при данном коэффициенте противодавления¹ циркуляционной системы камеры кратность циркуляции прямо пропорциональна корню квадратному из отношения площади сечения смесителя к суммарной площади инжекторов. Это определяет первое стремление конструктора подобрать такое сечение зоны смешения, при котором кратность циркуляции, при данном сечении инжекторов, будет максимальной. При этом необходимо, чтобы струи инжектирующего воздуха развились и заполнили сечение зоны смешения (фиг. 5), так как только в этом случае процесс ин-

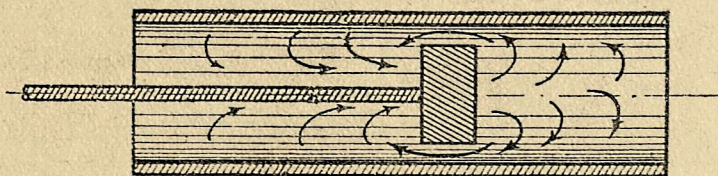
¹ См. „Справочник конструктора печей“, стр. 75 и далее.



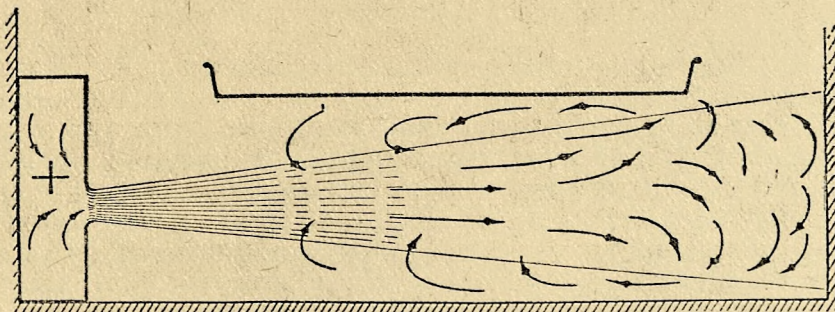
Фиг. 4. Неправильная схема инжекционного сушила с верхними инжекторами.



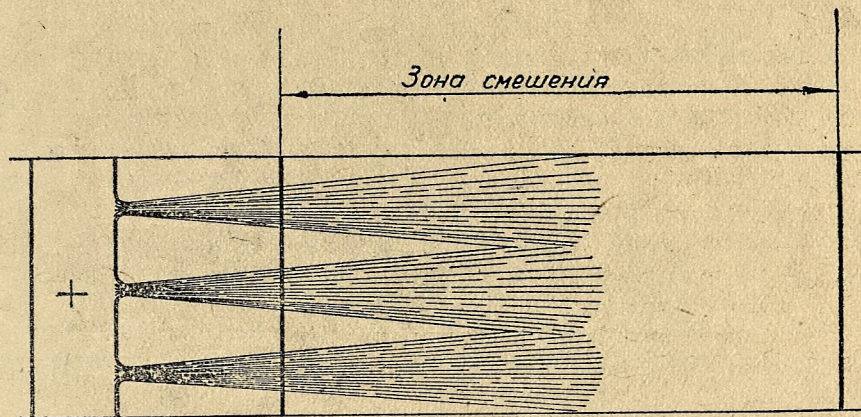
Фиг. 5. Правильное расположение воздушного факела в зоне смешения,



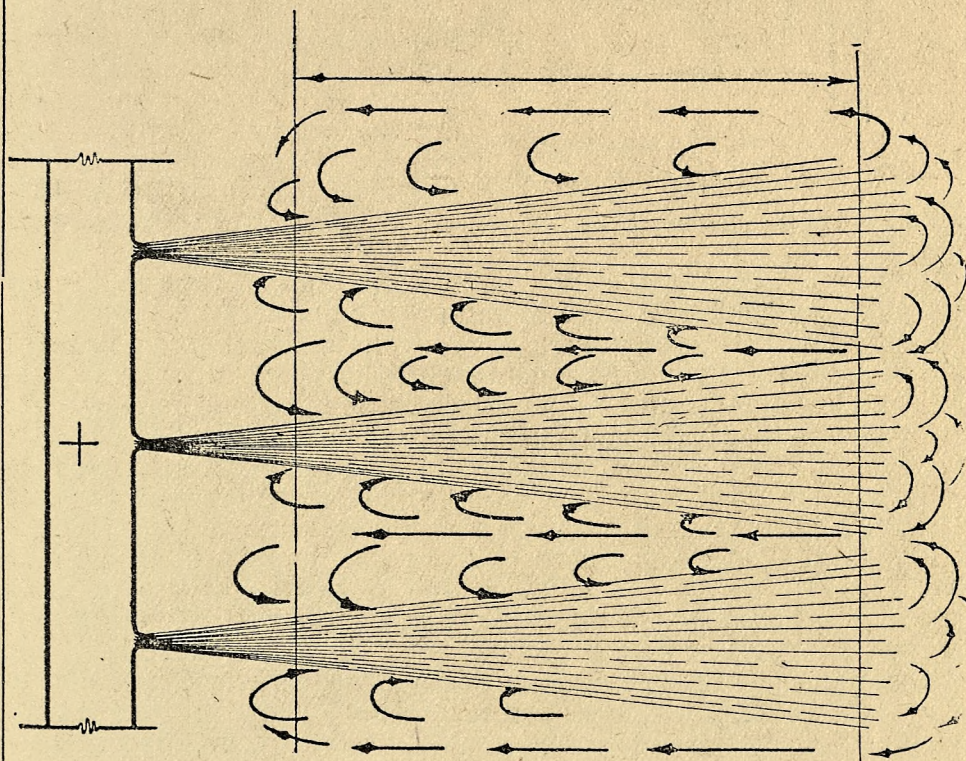
Фиг. 6.



Фиг. 7. Неправильное расположение воздушного факела в зоне смешения.



Фиг. 8. Правильное расположение воздушного факела в зоне смешения.



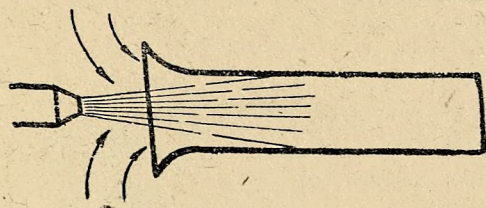
Фиг. 9. Неправильное расположение воздушного факела в зоне смешения.

жекции в камере будет устойчивым. Работу струи, не заполняющей сечение зоны смешения, можно уподобить поршню, неплотно прилегающему к стенкам цилиндра (фиг. 6), эффективность работы которого близка к нулю. В этом случае энергия струи будет израсходована на паразитное движение в зоне смешения (фиг. 7) в ущерб основной циркуляции воздуха у материала.

По длине приточного канала инжекторы необходимо размещать с такими интервалами, чтобы все струи инжектируемого воздуха пересекались в зоне смешения (фиг. 8), иначе возникнут вихри, как и в предыдущем случае, мешающие основной циркуляции воздуха у материала (фиг. 9).

Интервалы между инжекторами по длине приточного канала, так же как и высота зоны смешения, зависят от ширины сушильной камеры.

В обычных условиях, когда имеется доступный со всех сторон подход воздуха к всасывающей трубе (фиг. 10), инжектор представляет собой насадку с круглым отверстием.



Фиг. 10.

В инжекционных сушилах, где инжектирующийся воздух подается только с одной стороны, для увеличения поверхности соприкосновения его и воздушного факела выходному сечению инжекторов целесообразно придавать форму

вытянутых в вертикальной плоскости прямоугольников (щелей).

Последующая разработка теории инжекции показывает, что инжекция улучшается при наличии выступающих насадок.

Следующим ответственным элементом конструкции является зона распределения воздуха по сечению штабеля. Изучение инжекционных сушил на гидравлических моделях показывает, что для равномерного распределения воздуха во многих случаях необходима установка направляющих лопаток (фиг. 11), форма и расположение которых определяется на гидравлических моделях и зависит от скоростей воздуха и сопротивления в штабеле.

Испытание инжекционного сушила для шамотных изделий на заводе № 1 им. Артема в Часов-Яре показывает, что помимо формы и расположения направляющих лопаток существенное влияние на равномерное распределение воздуха оказывает так называемое „короткое замыкание воздушного потока“, т. е. стремление потока идти по пути наименьшего сопротивления, минуя свободные пространства, окружающие штабель, были минимальными (под штабелем, с боков и над штабелем).

Переходим к разбору конструкции каналов вентиляционной системы.

Расположение каналов со стороны нисходящих потоков отра-

ботанного воздуха заставляет делать их не только соответствующего сечения, но также такой формы, чтобы сопротивления для циркулирующего в камере воздуха были минимальными. Поэтому приточным каналам в инжекционных сушилах зачастую придают довольно причудливую форму. Кроме того, вся система вентиляции должна обладать максимальной плотностью, так как внутри системы давление достигает 50—70 мм вод. ст.

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЦИРКУЛЯЦИИ В ИНЖЕКЦИОННОМ СУШИЛЕ

Главной отправной точкой расчета циркуляции в инжекционном, так же как и во всех остальных сушилах с организованным движением воздуха, является перепад температуры воздуха, омывающего материал (Δt). От этой величины зависит равномерность сушки материала по ходу воздуха, которая не должна превышать допускаемых норм. Нетрудно убедиться, что перепад температур воздуха, омывающего материал, является функцией двух переменных: во-первых, интенсивности испарения влаги из материала (W) и, во-вторых, количества воздуха, циркулирующего через штабель (G), т. е. $\Delta t = f(W, G)$. Эта функция может быть выражена следующим уравнением:

$$\Delta t = \frac{qW}{c_p \cdot G}$$

где, помимо уже известных нам обозначений W и G , q — количество тепла, затрачиваемое на испарение 1 кг влаги (Кал/кг) и c_p — истинная теплоемкость воздуха при средней температуре в штабеле.

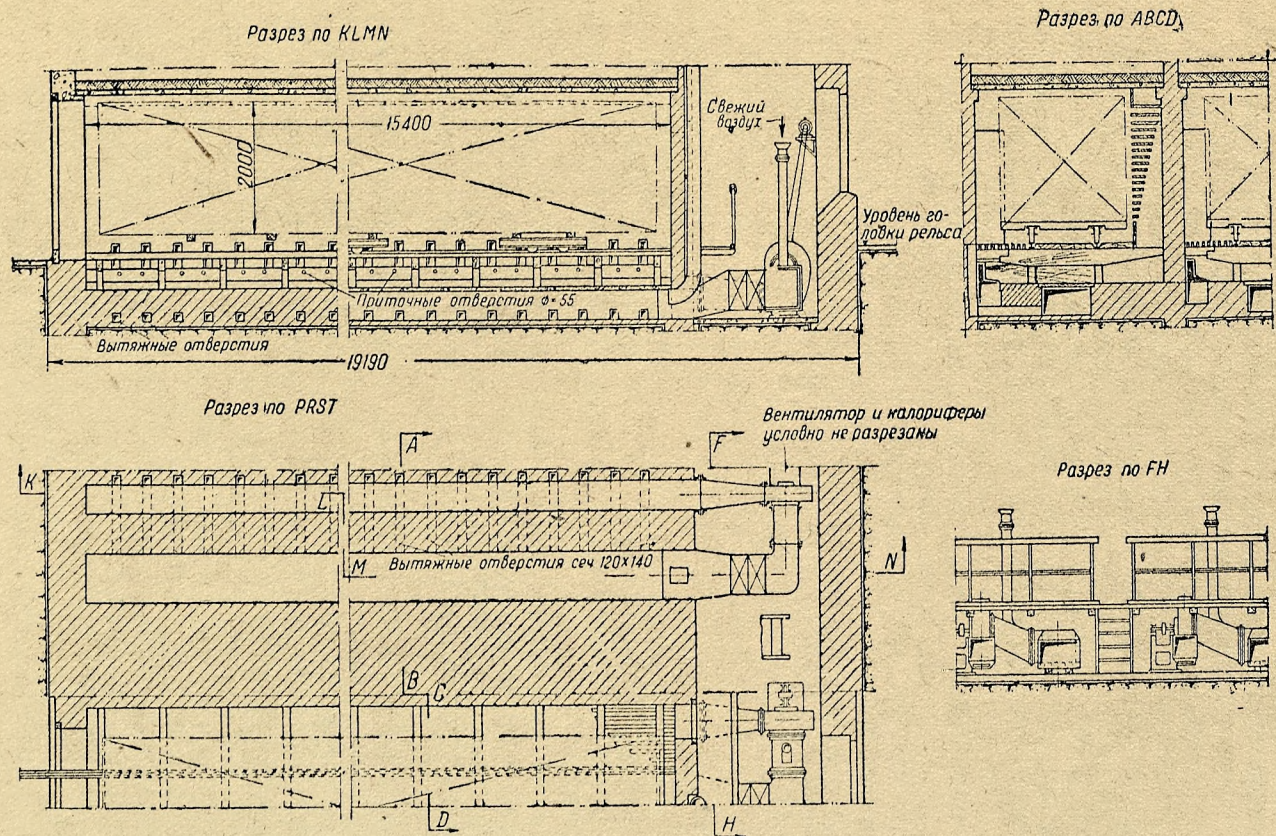
Значения величин q и c_p в условиях сушки дерева изменяются в зависимости от тепловых потерь камерой, а также от температуры и влагосодержания воздуха, но в условиях небольшого изменения последних эти величины могут быть приняты постоянными.

Анализ уравнения показывает, что, при прочих равных условиях, с уменьшением значения интенсивности испарения W при заданном расходе воздуха перепад температур падает; с уменьшением величины циркулирующего потока при данном значении W перепад температур растет. При сушке дерева, когда колебания конечной влажности не должны превышать 2%, как показывает опыт работы сушил с естественным движением воздуха, перепад температур составляет 5—6°.

В условиях сушки очень ответственного материала — авиалеса, где колебания конечной влажности дерева должны исчисляться долями процента, допускаемый перепад температур воздуха у материала не должен превышать 2°¹.

Для осуществления тех или иных условий при заданной

¹ См. ВСТ 1074, опубликованный в статье инж. Н. Н. Чулицкого „Исследование режима сушки древесины авиационной сосны“, часть II, стр. 44, Труды ВИАМ, 1934.



Фиг. 11. Инжекционное сушило для сушки особо широких досок авиадревесины (проект Теплового отдела Стальпроекта).

интенсивности испарения и определяется циркулирующий объем воздуха у материала.

Второй величиной, характеризующей циркуляцию инжекционного сушила, является сопротивление системы циркуляции. При расчете инъекции в сушилах принято эту величину выражать в виде отношения полного сопротивления системы к скоростному напору в зоне смешения, после чего дальнейший расчет инъекции может быть произведен по графикам „Справочника конструктора печей“, (стр. 76, 77), где основные величины, характеризующие явления инъекции, связаны в номограммы. Задаваясь отношением удельных весов приточного и циркулирующего воздуха (ν), кратностью циркуляции (n) и коэффициентом противодействия (ξ), по этим номограммам можно графически определить отношение диаметров $\Delta = D : D_1$ камеры смешения и инжектора.

В условиях инжекционного сушила отношение диаметров заменяется квадратным корнем из отношения $\sqrt{\frac{F}{F_1}}$ — сечения камеры смешения к суммарному сечению инжекторов. Зная отношение сечений, легко перейти к расходам воздуха через инжектор, его скорости и давлению в приточном канале.

Температура приточного воздуха определяется или непосредственно по $I-d$ -диаграмме, или аналитически.

В пределах небольших изменений кратности циркуляции при перепадах температур, не превышающих 10° , температура приточного воздуха может быть получена по следующей приближенной формуле:

$$t_1 = t_2 + n \cdot \Delta t$$

где

t_1 — температура приточного воздуха,

t_2 — температура воздуха, отходящего из материала,

n — кратность циркуляции и

Δt — перепад температур воздуха в сушале.

Ниже приводится полный расчет инжекционного сушила для авиалеса, проект которого разрабатывался Тепловым отделом Стальпроекта по заданию ЦАГИ (фиг. 11).

РАСЧЕТ СУШИЛА ДЛЯ ОСОБО ШИРОКИХ ДОСОК АВИАДРЕВЕСИНЫ ТВЕРДЫХ ПОРОД, ОСНОВАННЫЙ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПРИНЦИПЕ

Задание

Материал — доски шириной 500 мм, толщиной 32 мм.

Начальная влажность материала 75%.

Конечная влажность материала 8%.

Срок сушки 24 дня.

Перепад температуры в штабеле 2° .

Укладка досок без прозоров.

Прокладки 40×60 мм.

Расчетный режим (у входа в штабель): $t_1 = 50^\circ$ и $\varphi_1 = 80\%$.

Определение емкости штабеля и количества испаряемой влаги:

Объем одной доски $0,5 \times 0,032 \times 15 = 0,240 \text{ м}^3$.

По ширине штабеля укладывается 4 доски, по высоте $2000 : (32 + 40) = 28$ досок.

Досок в штабеле: $28 \times 4 = 112$.

Объем древесины в штабеле: $112 \times 0,24 = 26,8 \text{ м}^3$.

Приведенный уд. вес $\gamma = 625 \text{ кг/м}^3$.

Уд. вес влажного дерева:

$$\gamma_1 = \gamma \left(1 + \frac{W_1}{100} \right) = 625 (1 + 0,75) = 1095 \text{ кг/м}^3$$

Уд. вес сухого дерева:

$$\gamma_2 = \gamma \left(1 + \frac{W_2}{100} \right) = 625 (1 + 0,08) = 675 \text{ кг/м}^3$$

Количество испаряемой влаги из 1 м^3 древесины: $1095 - 675 = 420 \text{ кг}$.

Максимальное количество влаги, испаряемое в 1 час из камеры (считая, что это количество на 40% больше среднего):

$$\frac{420 \cdot 1,4 \cdot 26,8}{24 \cdot 24} = 27,2 \text{ кг}$$

Максимальное количество влаги, испаряемое в час с 1 м^2 поверхности материала

$$27,2 : 1680 = 0,0162 \text{ кг, или } 16,2 \text{ г}$$

Определение циркулирующего потока воздуха в камере и подсчет сопротивлений на его пути

При проходе воздуха через штабель тепло тратится только на испарение влаги. При заданном режиме температура материала составляет $\sim 46^\circ$. Скрытая теплота испарения 1 кг влаги и прогрев ее до 48° (температура воздуха, покидающего штабель) составит $619,0 - 46 = 573 \text{ кал}$.

При расчетном режиме влагосодержание воздуха равно $68,75 \text{ г}$ на 1 кг абс. сухого воздуха.

Теплоемкость, отнесенная к 1 кг абс. сухого воздуха, $c = 0,240 + \frac{68,8}{1000} \cdot 0,462 = 0,240 + 0,032 = 0,272 \text{ Кал/кг} \cdot ^\circ\text{С}$.

Для испарения 1 кг влаги при перепаде 2° потребуется пропустить через штабель абс. сухого воздуха

$$\frac{573}{0,272 \cdot 2} = 1050 \text{ кг абс. сух. возд.}$$

Следовательно, приращение влагосодержания при этом будет $1000 : 1050 = 0,953 \text{ г}$ на 1 кг абс. сухого воздуха.

Часовой циркулирующий поток через штабель равен $27,2 \cdot 1050 = 28\,600 \text{ кг}$ абс. сухого воздуха в час, или $28\,600 \left(1 + \frac{d}{1000} \right) =$

= 30 600 кг влажного воздуха в час, или 29 700 м³ влажного воздуха в час, или 8,25 м³/сек ($\gamma = 1,03 \text{ кг/м}^3$).

При принятых размерах камеры в ней создадутся следующие скорости и скоростные напоры (табл. 1):

Таблица 1

	Проходное сечение м²	Скорость м/сек	Скоростной напор мм вод. ст.
Штабель	$0,04 \times 15 \times 0,94 \times 27 = 15,2$	0,542	0,0154
После штабеля	$0,450 \times 15,4 = 6,93$	1,190	0,0742
Под штабелем	$0,400 \times 15,4 = 6,14$	1,342	0,0950
Восходящий поток в узком месте	$0,35 \times 15,4 = 5,40$	1,190	0,0742
Горизонтальный поток в лопатках	$15,4 (1,770 - 16 \cdot 0,01) = 15,4 \times 1,61 = 24,8$	0,333	0,0058

Сопротивление штабеля определяем по опытам проф. М. В. Кирпичева с водяной моделью штабеля $2 \times 2 \text{ м}$ из 25-мм досок с 25-мм прокладками. Его полное сопротивление определено в ~ 7 скоростных напоров. В данном случае при 40-мм прокладках считаем, что сопротивление штабеля составит 5 скоростных напоров.

Полное сопротивление циркуляционной системы составит

$$\delta = 5,0 \cdot 0,0154 + 0,0742 + 0,0950 + 0,0742 \approx 0,336$$

Коэффициент противодавления системы циркуляции составит

$$\zeta = 0,336 : 0,095 = 3,5$$

Определение полного перепада температур циркулирующего воздуха

Заданный перепад температуры в 2° получается только вследствие испарения влаги. Проходя у стен камеры, воздух охлаждается. Для учета его охлаждения определяем потери тепла ограждениями.

Потери тепла ограждениями, считая на крайнюю камеру и при одновременной работе соседней камеры, подсчитаны в табл. 2.

Потери тепла

$$47,8 \cdot 0,7 (50 + 30) + 46,2 \cdot 1 (50 + 20) + 0,67 \cdot 5,75 (50 + 15) = 6161 \text{ Кал/час}$$

Прогрев стен и перекрытия камеры даны в табл. 3.

Таблица 2

Ограждение	Размеры <i>м</i>	Поверх- ность <i>м²</i>	Кал/м·час °С	Возможная температура снаружи
Наружная стена	(15,4 + 3) × 2,6	47,8	0,7	— 30°
Перекрытие	15,4 × 3	46,2	1	— 20°
Дверь	2,3 × 2,5	5,75	0,67	— 15°

Таблица 3

Ограждение	Размеры <i>м</i>	Поверх- ность <i>м²</i>	Тепло- емкость <i>с</i>	Вес 1 <i>м³</i> <i>кг</i>	Толщина <i>м</i>	<i>Δt</i>
Наружная стена	(15,4 + 3) × 2,6	47,8	0,215	1600	0,510	30
Перекрытие	15,4 × 3	46,2	0,271	2400	0,075	30
Дверь	2,3 × 2,5	5,75	1,050	350	0,075	30

$$47,8 \cdot 0,215 \cdot 0,51 \cdot 1600 \cdot 30 + 46,2 \cdot 0,271 \cdot 0,075 \cdot 2400 \cdot 30 + 5,75 \cdot 1,05 \cdot 0,075 \cdot 350 \cdot 30 = 252\,000 + 67\,500 + 4750 = 324\,250 \text{ Кал}$$

Считая прогрев равномерно за все время сушки, получаем

$$\frac{324\,250}{24 \cdot 24} = 562 \text{ Кал/час}$$

Итого расход тепла в ограждениях

$$6161 + 562 = 6723 \text{ Кал/час}$$

Поскольку расчет ведем на установившееся состояние, прогрева материала не учитываем. Его учтем позже при определении полного расхода тепла на сушку.

Расход тепла на испарение влаги составляет:

$$27,2 \cdot 573 = 15\,500 \text{ Кал/час}$$

Полный расход тепла камерой (без расхода тепла с уходящим воздухом, — он будет учтен при расчете калорифера):

$$15\,500 + 6\,723 = 22\,223 \text{ Кал/час}$$

Полный перепад температур циркулирующего воздуха:

$$\Delta t = 2 \cdot \frac{22\,223}{15\,500} = 2,86$$

Расчет циркуляции в сушиле

Движение воздуха в сушиле возбуждается инжекционным действием горячего воздуха, вдуваемого в циркулирующий поток с большой скоростью.

После расчета ряда вариантов была выбрана конструкция, изображенная на фиг. 11. Горячий воздух, вдуваемый в камеру со скоростью 25,1 м/сек, при температуре 68° создает циркулирующий поток, требуемый расчетом; 28 600 кг абсолютно сухого воздуха в час эквивалентны 30 600 кг влажного воздуха в час, причем весовое количество его в семь раз меньше циркулирующего потока и составляет 4370 кг влажного воздуха в час.

Перепад температуры у калорифера увязывается с кратностью инжекции

$$n = (68 - 48) : 2,86 = 7$$

Перепад влагосодержаний между состоянием воздуха в отводящем и приточном каналах равен $0,953 \cdot 7 = 6,67$ г на 1 кг абс. сухого воздуха.

Влагосодержание воздуха при 48° (отработанного) равно $68,79 + 0,95 = 69,74$ г на 1 кг абс. сухого воздуха. Влагосодержание горячего воздуха равно $69,74 - 6,67 = 63,07$ г на 1 кг абс. сухого воздуха; относительная влажность $\varphi \approx 30\%$.

Производим поверочный расчет по номограмме (см. „Справочник конструктора печей“, стр. 76).

Удельный вес приточного воздуха при $t_1 = 68^\circ$

$$d_1 = 63,07 \text{ г на } 1 \text{ кг абс. сухого воздуха}$$

$$\gamma_1 = 0,973 \text{ кг/м}^3$$

Удельный вес отработанного воздуха при $t_2 = 48^\circ$

$$d_2 = 69,74 \text{ г на } 1 \text{ кг абс. сухого воздуха}$$

$$\gamma_2 = 1,030$$

Удельный вес смеси в условиях рассчитываемого сушила может быть принят $\gamma = 1,03$.

Для осуществления весовой кратности циркуляции $n = 7$ определяем отношение удельных весов.

$\gamma : \gamma_1 = 1,030 : 0,973 = 1,06$ и по номограмме нормаль 659 при коэффициенте противодавления $\zeta = 3,5$ определяем

$$\Delta = \frac{D}{D} = \sqrt{\frac{F}{F_1}} = 11,3$$

Суммарное сечение отверстий при коэффициенте сужения струи 0,62 составит

$$\frac{6,14}{11,3^2 \cdot 0,62} = 0,078 \text{ м}^2 = 780 \text{ см}^2$$

Разбиваем отверстия через 450 — 550 мм, всего их 30; точное значение диаметра 57,5 мм.

Для запаса задаем диаметр отверстий 55 мм, что обеспечивает скорость 27,5 м/сек.

Расход давления на создание этой скорости:

$$0,973 \cdot \frac{27,5^2}{2g} = 37,5 \text{ мм вод. ст.}$$

(При диаметре отверстия 50 мм мы получили бы $v = 33,2$ м/сек и $\delta = 54,5$ мм вод. ст.).

Принимая угол разлета струи 14° ($\text{tg } 7^\circ = 0,183$), находим, что при высоте прохода под штабелем 400 мм, на расстоянии (200—27,5):0,123 ≈ 1400 мм от отверстий поток воздуха коснется ограждений, и на оставшихся 1200 мм до заворота скорости по сечению потока успевают выравняться.

Определение мощности калорифера

При принятой системе движения воздуха калорифер подогревает возвращаемый из сушила воздух, часть которого уже удалена в отводящую трубу, а потом к нему примешивается свежий воздух.

Необходимую температуру подогрева воздуха в калорифере (74°) определяем графически по $I-d$ -диаграмме. Кратность циркуляции через калорифер будет

$$n = \frac{d_2 - d_0}{d_2 - d_1} = \frac{69,74 - 8,11}{6,67} = 9,25$$

Количество влажного воздуха, проходящего через калорифер, будет

$$G_1 \cdot \frac{n-1}{n} = 4370 \cdot \frac{8,25}{9,25} = 3900 \text{ кг/час} = 3800 \text{ м}^3/\text{час}$$

(количество сменяемого воздуха $\frac{G_1}{n} = \frac{4370}{9,25} = 472$ кг влажного воздуха в час).

Задание на расчет калорифера. Подогрев 3800 м³/час (при 48°) с 48 до 73° . Давление пара 4 ат (по манометру). Сопротивление — минимальное.

Расход тепла в калорифере:

$$3800 \cdot \frac{273}{321} \cdot 0,31 (74 - 48) = 26\,000 \text{ Кал/час}$$

Проверка. Расход тепла на испарение 1 кг влаги

$$\begin{aligned} q &= 1000 \cdot \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} - 46 = 1000 \cdot \frac{54,0 - 8,49}{69,74 - 8,11} - 46 = \\ &= 1000 \cdot \frac{45,51}{61,63} - 46 = 740 - 46 = 694 \text{ Кал} \end{aligned}$$

Расход тепла в час $694 \cdot 27,2 = 18\,800 \text{ Кал}$

Потери тепла камерой в час $6\,723 \text{ „}$

Итого в час $25\,523 \text{ Кал}$

Невязка составляет 2%, (если принять подогрев воздуха в калорифере до 73°,5, то обе цифры совпадают).

Останавливаемся на установке двух калориферов завода „Кооператор“ Н-5 последовательно с проходным сечением $0,50 \times 0,57 = 0,285 \text{ м}^2$.

„Весовая“ скорость

$$\frac{3900}{3600 \cdot 0,285} = 3,8 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$$

По опытам Кудинова¹ коэффициент теплопередачи (К) при этом колеблется в пределах от 14 до 18 $\text{Кал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}$.

Требуемая поверхность нагрева при средней разности температур:

$$\frac{150 + 100}{2} - \frac{74 + 48}{2} = 64^\circ$$

$$F = \frac{26000}{64 \cdot 16} = 25,4 \text{ м}^2$$

Два калорифера Н-5 имеют поверхность нагрева $15 \cdot 2 = 30 \text{ м}^2$.

Сопротивление каждого будет в пределах от 1 до 3 мм вод. ст. по тем же опытам. Принимаем их полное сопротивление 6 мм вод. ст.

Расчет вентиляционной системы

Сечение приточного канала равно

$$0,450 \cdot 0,320 + 0,1 \cdot \frac{0,45 + 0,15}{2} + 0,15 \cdot 0,20 = \\ = 0,144 + 0,03 + 0,03 = 0,200 \text{ мм}^2$$

Скорость воздуха в начале канала при расходе его

$$G : \gamma_1 = 1,220 : 0,973 = 1,25 \text{ м}^3/\text{сек} \\ v = 1,25 : 0,20 = 6,25 \text{ м/сек}$$

Скоростной напор $\delta = 2,0 \text{ мм вод. ст.}$

Отношение скоростей в канале и отверстиях ($27,5 : 6,25 = 4,4$) обеспечивает равномерное распределение воздуха по длине канала. Создание скорости в канале и потери на трение пойдут за счет скоростного напора, даваемого вентилятором, поэтому можно считать на нагнетательной линии давление 37,5 мм вод. ст.

Воздух попадает в отводящий канал через 30 отверстий $120 \times 30 \text{ мм}$ общей площадью $30 (0,12 \times 0,13) = 0,467 \text{ м}^2$.

Сечение отводящего канала равно $0,782 \times 0,425 = 0,332 \text{ м}^2$.

Расход отработанного воздуха

$$G_1 : \gamma_2 = 1,22 : 1,03 = 1,18 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Скорость и скоростной напор в отверстиях

$$v = 1,18 : 0,467 = 2,53 \text{ м/сек} \text{ и } \delta = 0,336 \text{ мм вод. ст.}$$

¹ См. журнал „Отопление и вентиляция“, № 3 — 4, 1930.

То же в канале:

$$v = 1,18 : 0,332 = 3,55 \text{ м/сек} \text{ и } \delta = 0,66 \text{ мм вод. ст.}$$

Потеря напора в отверстиях и канале

$$\delta = 2,5 \cdot 0,336 + 0,66 = 0,84 + 0,66 = 1,5 \text{ мм вод. ст.}$$

Соппротивление калорифера 6 мм вод. ст. На неучтенные потери добавляем еще 3 мм вод. ст. Всего на всасывающей линии потери составят $1,5 + 6 + 3 = 10,5$ мм вод. ст.

Полный статический напор, развиваемый вентилятором, составит $37,5 + 10,5 = 48,0 \approx 50$ мм вод. ст.

Производительность вентилятора $1,25 \cdot 3600 = 4500$ м³/час при 73°.

Ставим вентилятор № 4 (диаметр 400 мм); число оборотов выбираем на давление $50 \cdot \frac{346}{293} \approx 59 \approx 60$ мм вод. ст.; по каталогу 1135 об/мин; мощность мотора 2 л. с.

Приток воздуха осуществляется через отверстие, открытое в помещение.

Расход воздуха 472 кг в час.

При 15° и 75-процентной относительной влажности (уд. вес $\gamma = 1,20$) это составит $472 : 1,2 = 393$ м³/час, или 0,109 м³/сек.

Разрежение в патрубке между калорифером и вентилятором равно ~ 10 мм вод. ст.

Задаем скорость воздуха 7 м/сек.

Сечение канала $F = 0,109 : 7 = 0,0156$ м²; диаметр 140 мм; принимаем 150 мм.

Расчет отводящей трубы. В отводящем канале имеется разрежение 1,5 мм вод. ст. по расчету. Предполагая, что в камере имеется разрежение 1 мм, будем считать, что в канале имеем 2,5 мм, на которые мы рассчитываем отводящую трубу. Скорость в канале определена в 3,55 м/сек, такую же задаем в трубе.

Расход воздуха $3800 : 8,25 = 460$ м³/час, или 0,128 м³/сек.

Сечение трубы $0,128 : 3,55 = 0,0362$ м²; диаметр 215 мм.

Задаем диаметр трубы 220 мм. Потери на трение в трубе будут $\sim 0,5$ мм вод. ст. Труба должна преодолеть $1,5 + 0,5 = 2$ мм вод. ст. Ее высота при состоянии наружного воздуха 5° и удельном весе 1,25 будет

$$H = \frac{2}{1,25 - 1,05} = 10 \text{ м}$$

СУШКА ДЕРЕВА В ПРОДУКТАХ ГОРЕНИЯ

В настоящее время перед конструкторами-сушилщиками стоит очень важная для лесной промышленности проблема разработки системы сушила для дерева, в котором теплоносителем будет смесь продуктов горения топлива с воздухом. Сушка непосредственно дымовыми газами должна быть более экономичной в отношении расхода тепла, и вся установка благодаря отсутствию котельной должна быть дешевле и проще.

По предварительным данным Теплотехнического института (см. „Известия Т. И.“ № 5, 1930) экономия топлива будет равна приблизительно 25%, и стоимость сушки в камерах, работающих на дымовых газах, составит 65% от стоимости ее в паровых сушилах.

Эти очевидные преимущества удастся получить лишь в том случае, если будет решена проблема совершенного сжигания топлива — получение чистых продуктов сгорания его без уноса золы, искр, недогоревших газов и смолы, так как главные затруднения при применении дымовых газов в сушилах для дерева заключаются в пожарной опасности и в загрязнении материала продуктами неполного сгорания топлива.

Слабое развитие топочной техники в прошлом и, следовательно, невозможность гарантировать указанные условия сжигания заставили конструкторов вступить на путь проектирования сушил с огневыми калориферами, устанавливаемыми внутри камеры, без непосредственного впуска газов в сушильную камеру.

Калориферы выполняются обычно в виде различных комбинаций кирпичных боровов и железных труб, внутри которых протекают газы из топки. Несмотря на то что первые сушила для дерева чаще строились с такими калориферами, до сих пор нет еще конструкции калорифера, которая решила бы вопрос применительно к массовой сушке пиломатериалов. Плохая работа сушил с огневыми нагревателями происходит из-за невозможности получить нужный режим и из-за неравномерной темпера-

туры в камере; это привело к тому, что теперь подавляющее большинство сушил для дерева строится с паровым отоплением.

Тепловой отдел Стальпроекта в 1929—1930 гг. разработал два проекта сушил для дерева с огневым калорифером. Первый проект небольшой камеры емкостью 20—25 м³ древесины был составлен для предприятий промысловой кооперации. Камера работает удовлетворительно. Чертеж ее дан на фиг. 1. Второй проект сушила непрерывного действия для массовой сушки пиломатериалов дан на фиг. 2. Этот проект разработан в эскизном виде и не проверен на практике.

В настоящее время техника сжигания топлива и газификация его, в частности методы сжигания древесных отходов (обычного топлива лесной промышленности), настолько изучены, что имеется возможность по-новому поставить проблему сушки непосредственно дымовыми газами. Ниже приводим возможные схемы таких сушильных устройств для дерева и кратко перечисляем преимущества и недостатки их и те проблемы, которые нужно будет решить конструкторам для проведения в жизнь этих схем.

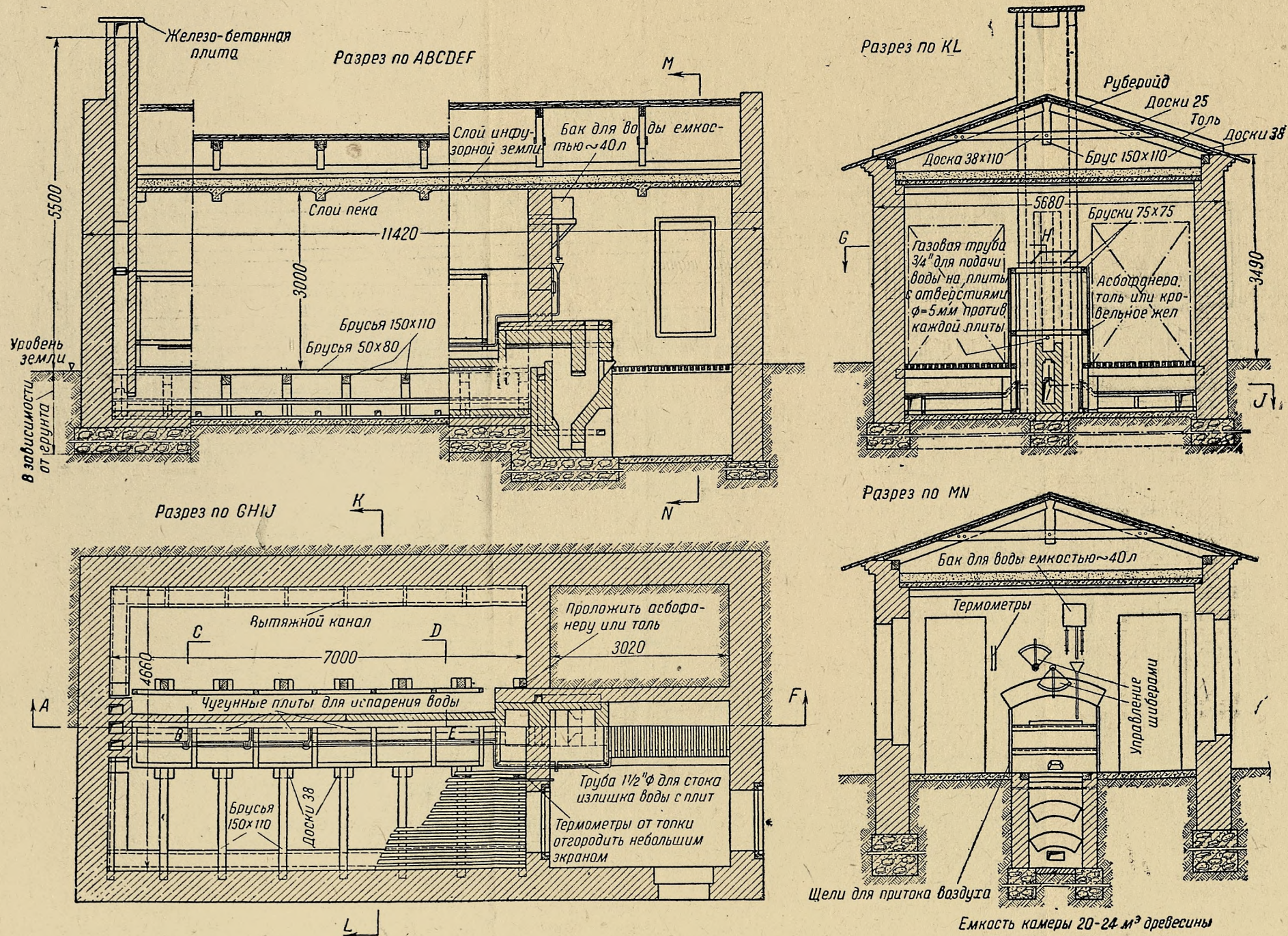
УСТРОЙСТВО СУШИЛЬНЫХ КАМЕР

Наличие вентилятора для подачи горячей смеси в сушильную камеру и возврат части отработанных газов определяют в данном случае систему сушила с принудительным движением воздуха.

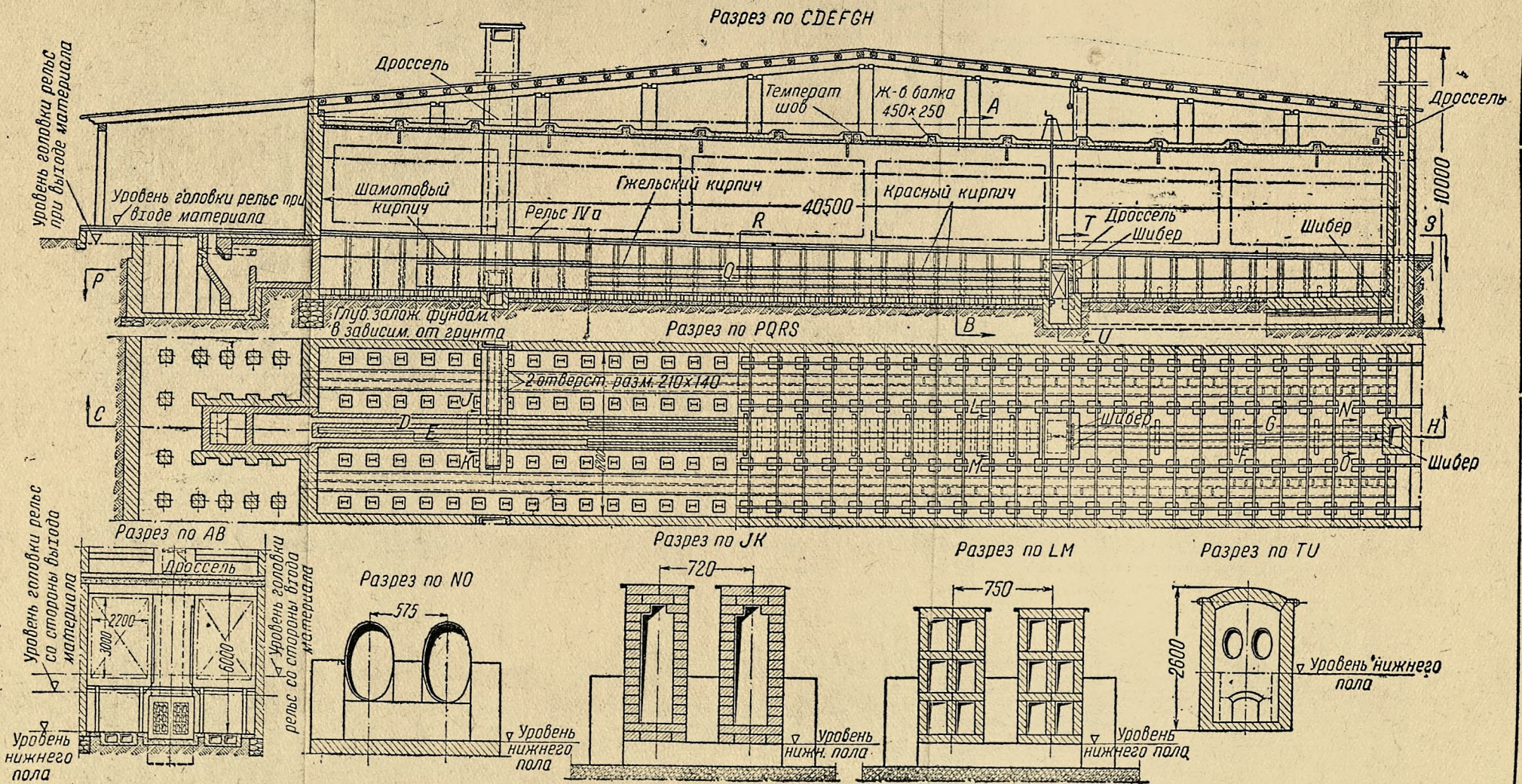
Камеры периодического действия наиболее рационально проектировать с горизонтальной поперечной циркуляцией воздуха.

Для равномерного распределения воздуха по длине камеры необходимо в отверстиях канала, подающего свежую смесь в сушило, иметь скорость в два раза больше, чем скорость в самом канале. При таком соотношении скоростей удается делать отверстия в канале одинакового сечения и через равные расстояния на всей длине канала. Практически скорость в отверстиях приточного канала сушила с принудительной циркуляцией дают 10—15 м/сек. Такая скорость воздуха, если ее соответствующим образом не использовать, помимо бесцельного расхода энергии на ее создание, будет вредно действовать на равномерность сушки штабеля, создавая местные зоны очень интенсивной сушки.

Избежать этих недостатков можно, воспользовавшись инжектирующим влиянием струи газа, подаваемого с большой скоростью. Для этого габариты камеры должны дать возможность струям горячих газов развиваться так, чтобы к штабелю уже подходила смесь газов, свежих и отработанных, с малой скоростью и нужной температурой. При такой системе количество воздуха, циркулирующего через вентилятор, будет меньше соответственно кратности инжекции в сушиле. В связи с этим уменьшается расход энергии на вентилятор и оправдывается расход ее на создании скорости в соплах инжекторов.



Фиг. 1. Камера периодического действия с огненным калорифером (проект Теплового отдела Стальпроекта).



Фиг. 2. Сушило непрерывного действия с огненным калорифером (проект Теплового отдела Стальпроекта).

Конструкция инжекционных устройств и кратность инъекций легко могут быть определены расчетом и проверены на гидравлических моделях, построенных на основании теории подобия.

Распределение воздуха по вертикали штабеля является также большим местом почти всех сушил для дерева. В этом отношении большую помощь могут оказать направляющие воздух лопатки типа Прандтля, установка которых, как показывает опыт, решает эту сложную задачу.

В сушилах непрерывного действия следует воздух направлять вдоль туннеля, но при этом штабеля должны загружаться поперек оси сушильного канала, ширина которого будет равняться длине штабеля.

В сушилах непрерывного действия с горизонтальным потоком основными недостатками являются: 1) расслоение воздуха по высоте штабеля, обычно наблюдаемое при скорости воздуха менее 2 м/сек, и 2) неверно выбранная длина сушила. В коротком туннеле материал не успевает высохнуть, избыточная длина вызывает конденсацию влаги на материале. Необходимо поэтому сушила непрерывного действия проектировать так, чтобы штабелевка материала безусловно была связана с направлением движения воздуха. Кроме того туннель нужно делать таких размеров, чтобы штабеля проходили с возможно малыми зазорами по габариту. Воздух в такой туннель должен быть подведен через поперечный канал у пола камеры. Этот канал должен быть большого сечения, т. е. такого, чтобы можно было осуществить равномерное распределение воздуха вдоль него (по ширине туннеля), не создавая больших скоростей в распределительных отверстиях канала. Перед входом в штабель воздух должен быть распределен по высоте с помощью направляющих лопаток.

Удаление отработанного воздуха в сушиле надо производить со стороны мокрого конца, у пола сушила. Поперечная загрузка требует трехрельсовых широких путей, поэтому при такой системе возникают большие затруднения с внутривозовским транспортом.

В большинстве установок штабель задают в камеру по длине. В этом случае система продольного движения воздуха должна быть заменена системой с винтовым движением воздуха и с подачей его по зонам, каждая из которых регулируется отдельно. Схема каждой зоны аналогична сушилу периодического действия.

ТОПЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СУШИЛ

Простая топка с горизонтальными колосниками

Основное требование, которое необходимо предъявлять к топке для сушила, состоит в том, что топка должна давать догоревшие газы равномерно нужной температуры без уноса золы и искр. Топка с простой колосниковой решеткой не может обеспечить

ПРОСТАЯ ТОПКА

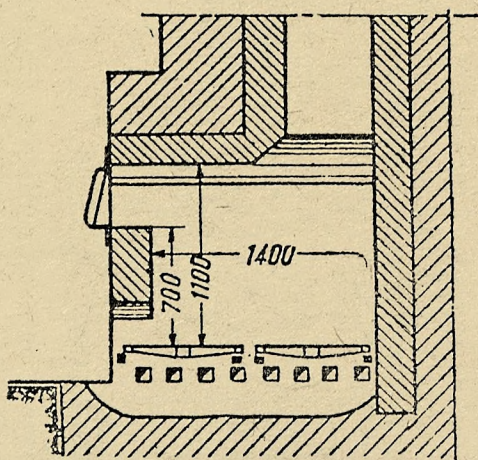


Рис. 1. Разрез простой топки.

Примером простой топки для дров может служить топка туннеля Фужерона, имеющая площадь колосников 1400×1000 -мм и толщину слоя топлива $\infty 800$ мм (фиг. 1). Загрузка дров в топку производится через 20 мин. и сильно влияет на состав продуктов горения. Типичными для данной топки являются записи автоматического газоанализатора „MONO“, приведенного на рис. 2; характерен непостоянный анализ продуктов горения. Колебаний в коэффициенте избытка воздуха от $\alpha = 0,8$ до 0,6, что влечет значительные потери тепла с недогоранием и избытком воздуха.

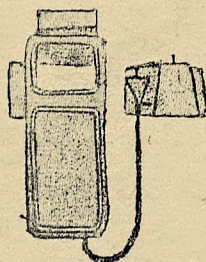


Рис. 1 а.

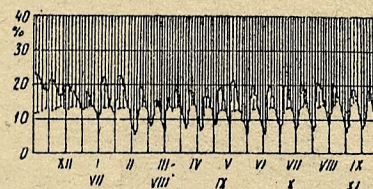


Рис. 2. Кривая продуктов горения при желании получить нейтральную атмосферу.

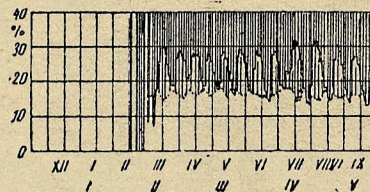


Рис. 3. То же при желании получить слабо восстановительную атмосферу.

ПОЛУГАЗОВЫЕ ТОПКИ

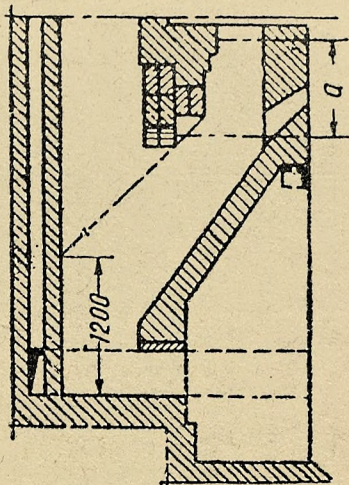
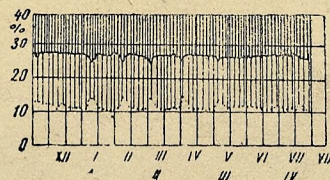
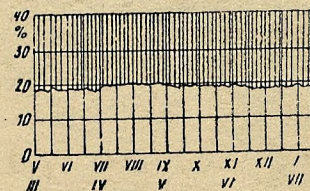
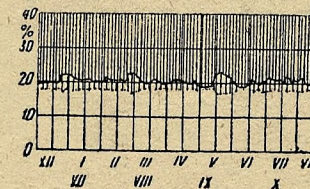


Рис. 4. Разрез полугазовой топки.

Совершенно другую картину горения мы видим в полугазовой топке. На рис. 3 изображен профиль полугазовой топки, разработанной проф. В. Е. Грум-Гржимайло. Эти топки получили широкое распространение в фарфоровой промышленности. Общее число построенных топок за период 1925—33 гг. более 50 шт. Конструкция топки видна из рис. 4. В этой топке имеется шихта, в пределах которой уровень топлива может меняться, не влияя на режим горения. Благодаря этому при периодической загрузке все же осуществляется непрерывное питание слоя топлива, что устраняет пульсацию в анализе газа. На рис. 5 и 6 даны записи „MONO“. Как видно из этих записей полугазовые топки дают совершенно однородное горение без пульсации. Наблюдение за работой и обслуживание их никаких трудностей не вызывает.

Фиг. 3. Сравнительная характеристика простых и полугазовых топок, работающих на дровах, торфе и древесных отбросах.

Рис. 5. Полугаз из торфа. Анализ по ОРСА $\text{CO}_2 - 12\%$, $\text{CO} - 16\%$, $\text{H}_2 - 10\%$, $\text{W}_2 - 62\%$. Q раб.-800 ккал/м³.Рис. 6. Кривая продуктов сгорания полугаза $\text{CO}_2 - 19,5 - 20,5\%$. $\alpha - 1 - \text{const}$.Рис. 7. Продукты сжигания полугаза с недостатком воздуха $18\% \text{CO}_2$, $3 - 4\% \text{CO}$.

этих требований вследствие нарушения горящего слоя топлива при периодических загрузках и шуровке топки. В простой топке весь воздух для полного сжигания проходит через слой топлива, в слое образуются большие скорости газов, которые способствуют уносу в сушило золы и искр.

Применение простых топок требует надежных искроуловителей, конструкция которых еще не разработана.

Полугазовые топки

Тепловой отдел Стальпроекта (б. Мосгипромет) разработал полугазовую топку системы проф. В. Е. Грум-Гржимайло, преимущества которой ясны из данных фиг. 3. В такой топке имеется возможность сжигать древесные отбросы с влажностью до 40—45%.

Благодаря тому, что в полугазовой топке через слой топлива проходит меньше половины всего воздуха, необходимого для полного горения, скорость его в слое незначительна, и при правильно выбранном напряжении зеркала горения, как показывает опыт, унос золы незначителен. Небольшая камера за топкой для дожигания летучих топлива служит одновременно и уловителем небольшого количества золы, которая может быть вынесена из слоя топлива.

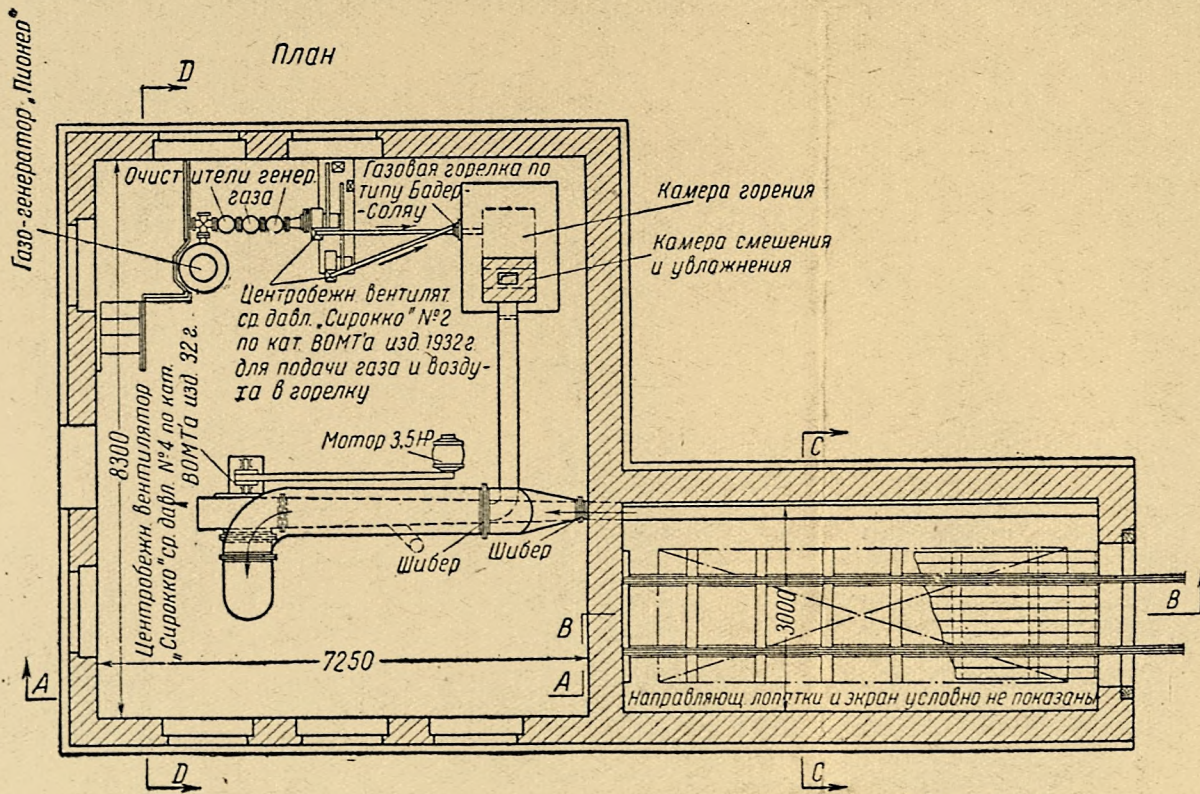
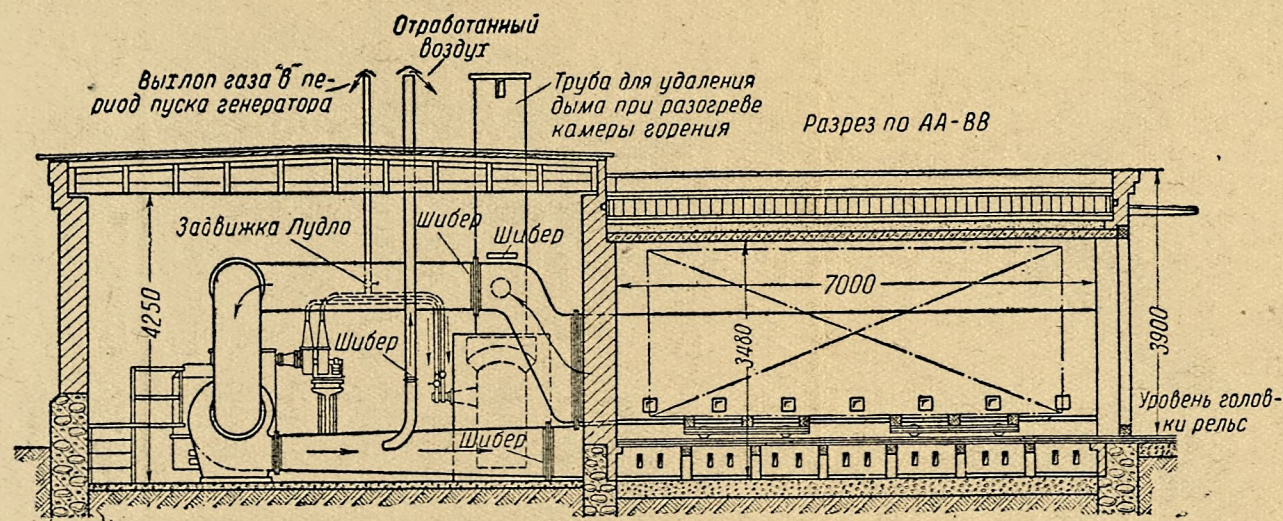
СУШИЛА С ГАЗОГЕНЕРАТОРОМ

Сжигание древесных отбросов с предварительным их газифицированием дает ряд преимуществ. Продукты горения газа чисты, не содержат несгоревших частиц, золы и искр, и поэтому отпадает необходимость в их очистке, безопасны в пожарном отношении, и материал не загрязняется.

В этом газогенераторы имеют большое преимущество даже по сравнению с полугазовыми топками. Однако устройство генераторной станции более дорого и требует более квалифицированного ухода. Особенно много хлопот при генераторной установке доставляет очистка газа, устройство которой неизбежно при сжигании сырых древесных отбросов. Кроме того работа на горячем неочищенном газе ненадежна в силу загрязнения смолами газопроводов.

Несмотря на то что генераторная установка имеет еще преимущество в смысле централизации сжигания топлива и простого подвода газа к отдельным сушильным камерам, эксплуатационные трудности с генераторами сравнительно с полугазовыми топками позволяют пока ставить вопрос лишь об опытной установке сушил на генераторном газе.

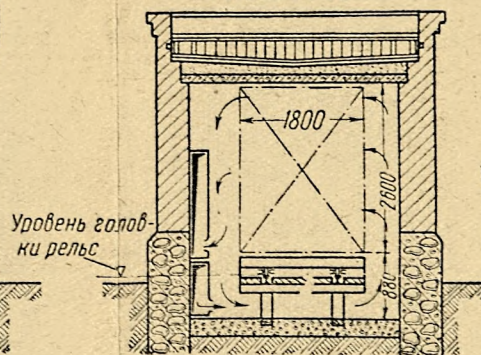
Наиболее простая схема сушильной установки с генератором дана на фиг. 4. По этой схеме Стальпроектом спроектирована опытная установка для ЦНИИМОД, в которой принят генератор системы С. И. Декаленкова, применяемый для газовых двигате-



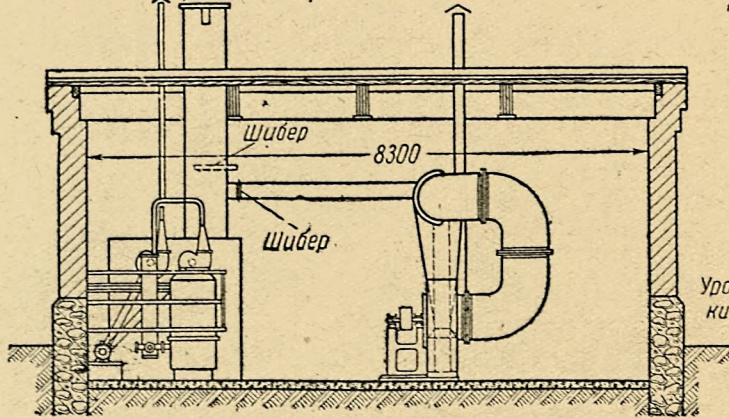
Примечание

1. Емкость камеры 14,6 м³-1" досок
2. Расход газа 58 м³/час

Разрез по СС



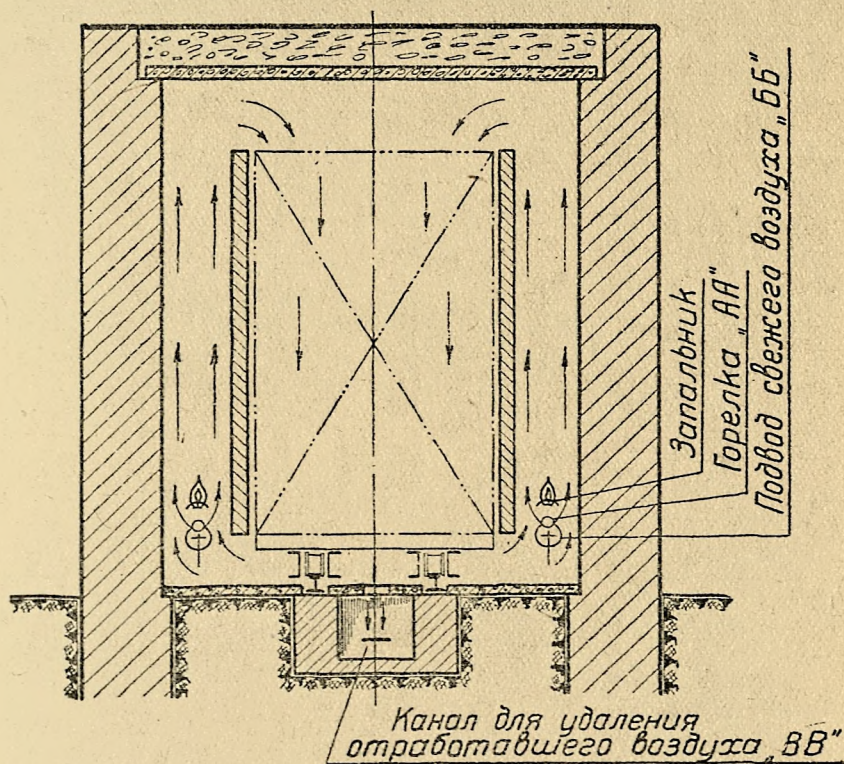
Разрез по DD



Фиг. 4. Схема сушила для леса, отапливаемого продуктами горения генераторного газа (проект Теплового отдела Стальпроекта).

лей. Этот генератор с обращенным горением, и поэтому газ, получаемый из него, не содержит смол и требует очистки только от твердых частиц, уносимых вместе с газом.

Для опытной установки такой генератор очень удобен; для обычных условий лесопильного завода он не годится, так как требует сухого топлива. Газ вентилятором подается к горелке у камеры сжигания; другой вентилятор подает воздух к той же горелке. Для опытной установки принята турбулентная горелка типа Бадер-Салау с отдельным регулированием газа и воздуха,

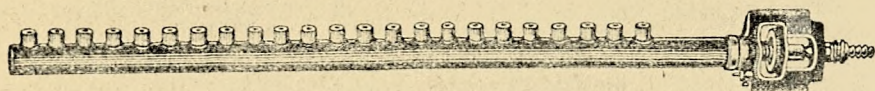


Фиг. 5. Схема сушила с естественным движением воздуха и газовыми горелками.

что для опытной установки необходимо. Газы из камеры горения проходят в смесительную камеру, где происходит увлажнение их паром. Третий вентилятор нагнетает смесь в сушильную камеру.

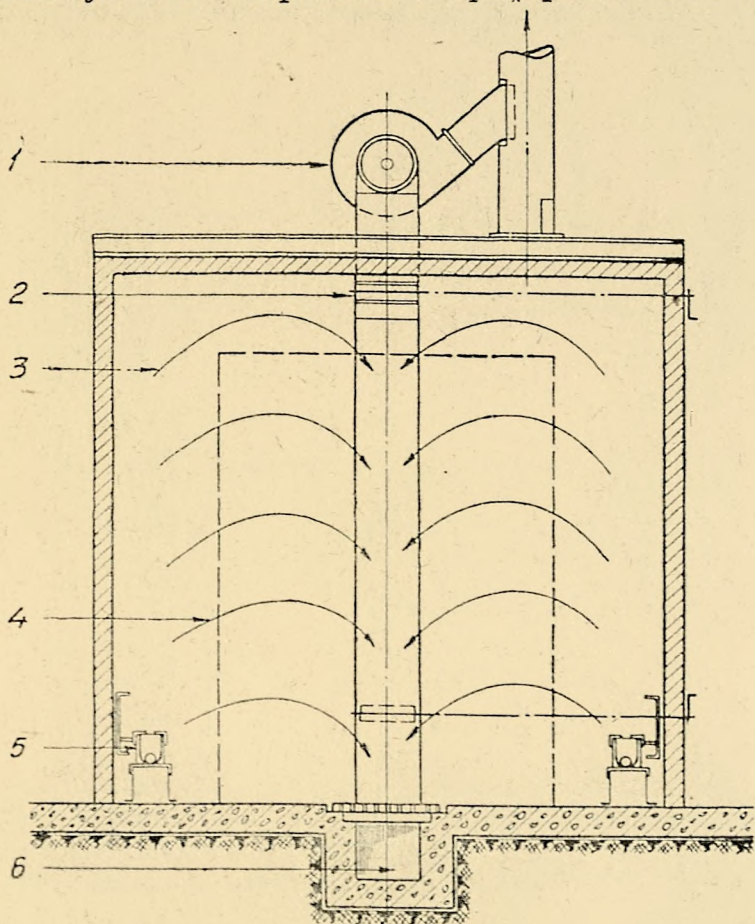
Камера разработана так, что в ней можно осуществить систему принудительного движения воздуха с поперечной циркуляцией от вентилятора или с помощью инъекции. Отработанный воздух возвращается в камеру смешения. Часть его выбрасывается через отвод, соответствующая часть свежего воздуха поступает в камеру смешения. В камеру горения включен змеевик, в ко-

тором получается пар для увлажнения воздуха в отдельные моменты процесса сушки.



Фиг. 6. Горелка типа Селас.

Чрезвычайно заманчивым по своей простоте является сушило, схема которого дана на фиг. 5. Движение воздуха естественное; осуществляется по принципам проф. В. Е. Грум-Гржимайло аналогично сушилам с паровыми калориферами той же системы.



Фиг. 7. Схема сушила типа Swarwout с газовыми горелками.

В этой схеме совершенно отсутствует топка, камера смешения, подводящие воздухопроводы и вентилятор, поэтому вся установка элементарно проста. Для отопления служат газовые

горелки, аналогичные изображенной на фиг. 6. Свежий воздух подается по лотку, установленному под горелкой.

Главным недостатком этой схемы является возможность взрыва в камере в случае если часть факелов гаснет и камера наполняется газом. Такие горелки требуют высококалорийного газа, подаваемого под давлением не менее 1000 мм вод. ст. Употребление их в сушилах имеет место пока только за границей, и очень краткие сведения об их работе можно найти только в проспектах фирм, изготовляющих горелки.

На фиг. 7 дана схема такого сушила фирмы „Swartwout Industrial Ovens“. Для предотвращения взрывов в заграничных установках применяется так называемый дежурный огонек, или запальник, но устройство его остается еще неясным.

Эта схема может быть развита и для сушки материалов, требующих принудительного движения воздуха, тогда в трубу нагнетается не смесь газа с воздухом, как это имеет место в указанном случае, а чистый газ или газ с недостаточным для горения количеством воздуха. По длине трубы устанавливаются маленькие инжекторные горелки, горение в которых происходит за счет воздуха, циркулирующего в сушильной камере. Такая схема конструктивно пока не разработана.

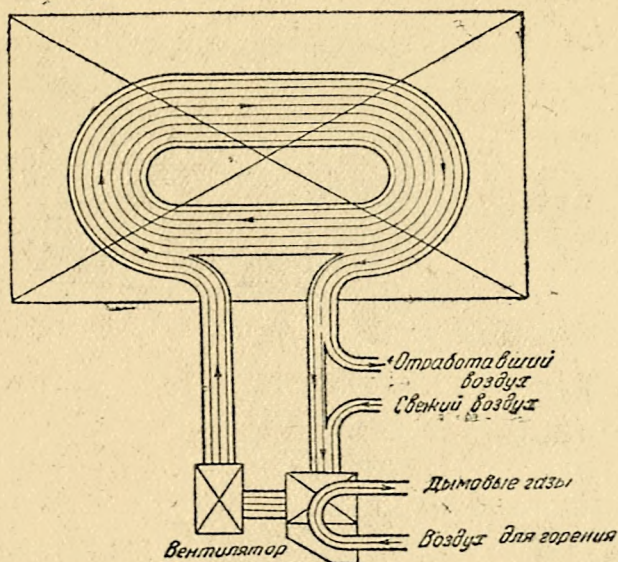
Применение газового топлива дает возможность вести сушку в нейтральной атмосфере газов и тем уменьшить пожарную опасность.

СУШИЛА, РАБОТАЮЩИЕ НА ЧИСТОМ ВОЗДУХЕ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

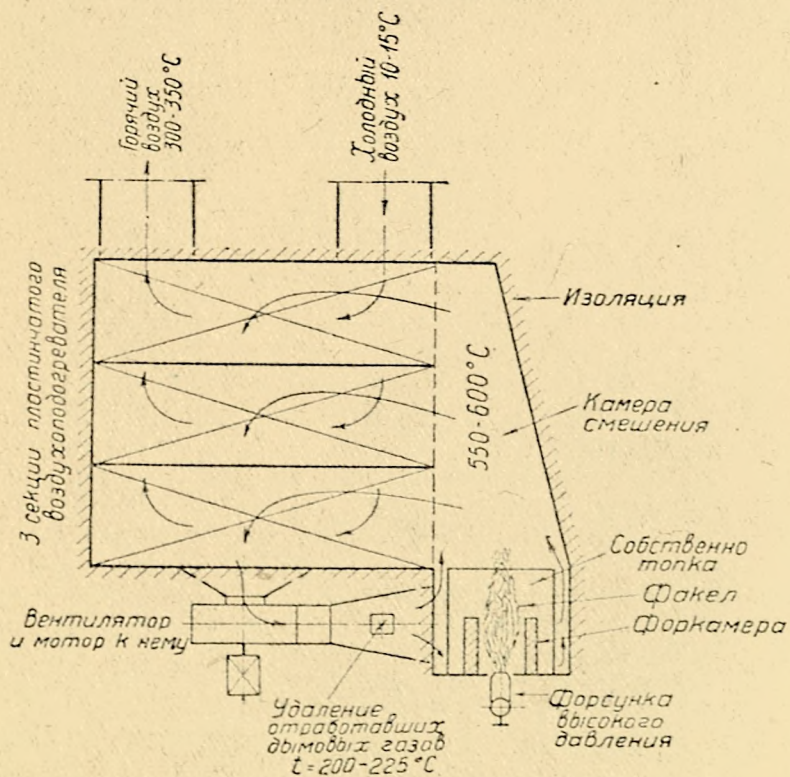
На фиг. 8 дана схема инжекционной установки, через которую в камеру вместо смеси дымовых газов подается чистый горячий воздух. Такая установка может быть применена для сушки ценных пород древесины, не допускающих малейшего загрязнения продуктами горения. Эта схема также совершенно безопасна в пожарном отношении.

Для подогрева воздуха установлен калорифер, работающий на продуктах сгорания газа или мазута. Такой подогреватель фирмы Шильде установлен у эмалировочных сушил Горьковского автозавода. Калорифер, в противоположность большинству конструкций таких калориферов, очень прост и компактен. Перед секциями пластинчатого воздухоподогревателя расположена газовая или нефтяная топка. Собственно топка состоит из железного барабана диаметром 600—700 мм. В наружном торце барабана установлена форсунка или горелки. Футерована только небольшая форкамера у сопла горелки. Барабан установлен внутри топочной камеры, также железной, изолированной снаружи асбестом. Факел пламени заканчивается в барабане, который охлаждается снаружи продуктами горения, отработавшими в воздухонагревателе. Продукты горения из калорифера подаются вентилятором к барабану, охлаждают его, смешиваются с газами факела, и смесь с температурой 550—600° уходит в воздухо-

Инжекционная сушильная камера



Фиг. 8. Схема инжекционного сушила, работающего на чистом воздухе.

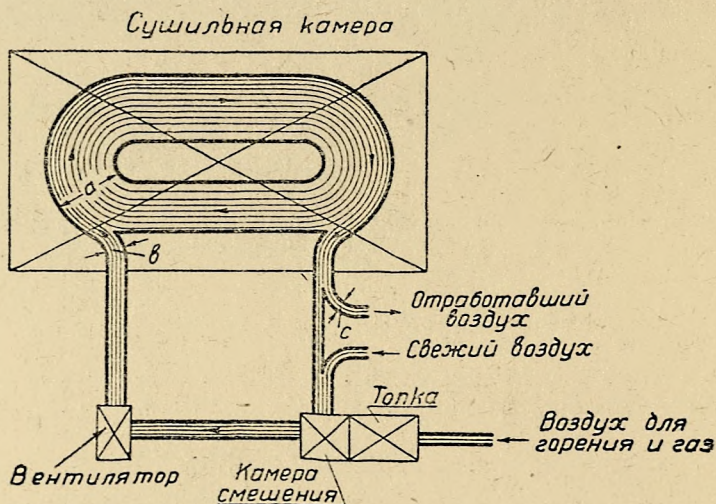


Фиг. 9. Схема воздухоподогревателя.

нагреватель. Температура отходящих газов из воздухонагревателя 200—225°. Часть газов выбрасывается в атмосферу. Подогрев воздуха происходит до температуры 300—350°. Схема воздухонагревателя дана на фиг. 9.

СХЕМЫ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В „Известиях В. Т. И.“ № 5 за 1930 г. приведена схема сушила, работающего на дымовых газах. По этой схеме работниками Гипролеспроба составлен проект сушила непрерывного действия „Оптимум“. В этом проекте простая топка, которую обычно рекомендует Теплотехнический институт, правильно заме-



Фиг. 10. Схема инжекционного сушила, работающего на смеси дымовых газов и воздуха.

нена полугазовой системы Стальпроекта. Ошибка в схеме сушила заключается в том, что долевое движение газов по рабочему каналу сушила совмещено с долевой загрузкой штабелей материала.

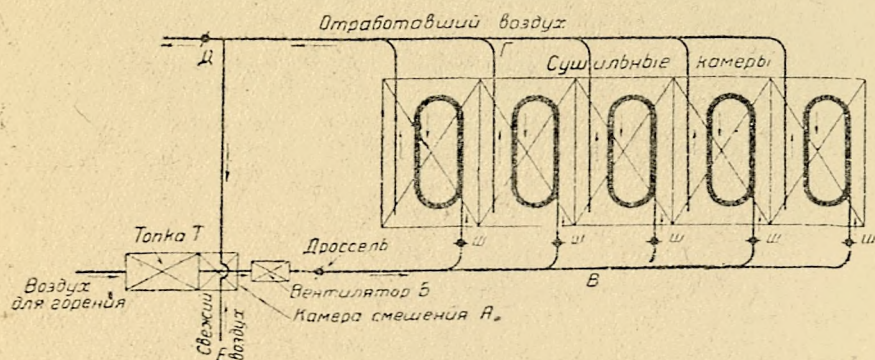
Для сушил периодического действия, кроме изменения системы топки, необходимо ввести вторую поправку в схему движения воздуха в камере, применив инжекцию.

Схема инжекционного сушила дана на фиг. 10. В этой схеме кратность инжекционного устройства равна $(a:b)$, кратность через вентилятор $(b:c)$, общая кратность $(a:b)(b:c) = a:c$.

Таким образом объем воздуха, прогоняемого через вентилятор, в инжекционном сушине меньше того же объема, прогоняемого вентилятором в простой циркуляционной системе, в отношении $a:b$; соответственно меньше и расход энергии на работу вентилятора. Энергия, расходуемая на создание скорости в соплах инжекционного сушила, меньше расхода энергии на транспор-

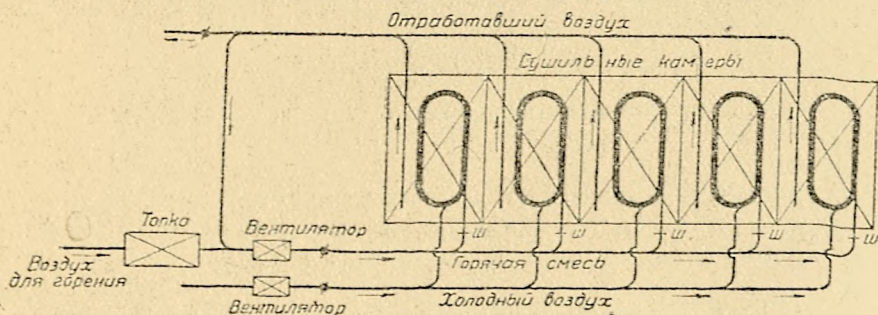
тирование всего циркулирующего объема воздуха по системе воздухопроводов в обычном циркуляционном сушиле.

При наличии блока сушильных камер проще всего у каждой камеры делать отдельную топку и вентилятор. Это дает простое и гибкое управление, не влияя на работу соседних камер.



Фиг. 11. Схема установки блока камер, работающих от одной топки и вентилятора.

На фиг. 11. дана схема установки блока камер, работающих от одной топки и вентилятора. Продукты горения из полугазовой топки поступают в камеру смешения и увлажнения и нагнетаются вентилятором в распределительный воздухопровод. Этот



Фиг. 12. Видоизмененная схема фиг. 11, дающая большую свободу регулирования режима сушки.

воздухопровод рассчитывается так, чтобы падение давления смеси по длине было незначительным. Тогда в этом воздухопроводе с помощью дросселя, работающего от автомата давления, можно всегда иметь постоянное давление газа вне зависимости от расхода газов во всем блоке и тем уничтожить влияние работы одной камеры на другую.

Удаление воздуха из сушильных камер осуществляется тем же вентилятором через отводящую систему в камеру смешения.

Часть воздуха удаляется через отвод D в атмосферу под действием скоростного напора. Соответствующее количество свежего воздуха поступает в камеру смешения через патрубок.

Работа камер по этой схеме связана тем, что все режимы сушки материала лежат на прямой, соединяющей две точки в $I-d$ -диаграмме, соответствующие состоянию подводимой смеси и смеси, удаляемой из сушила.

Схема, дающая большую свободу в режимах, но зато и более сложная, изображена на фиг. 12. Здесь параллельно с воздухопроводом горячей смеси, в котором, как и в предыдущем случае, устанавливается смесь воздуха, p , t и ϕ которого постоянные, укладывается второй воздухопровод, в который второй вентилятор нагнетает свежий воздух под постоянным давлением, регулируемым дросселем, аналогичным установленному на воздухопроводе горячей смеси.

Удаление газов из камер происходит так же, как и из сушила, приведенного на фиг. 11. Ввода свежего воздуха в камеру смешения нет. В обеих схемах (фиг. 11 и 12) регулирование режима в камерах ведется с помощью открытия шиберов $ш$ на отводах в камеру и с помощью пропарок.

Редактор горн. инж. *Б. М. Галлай*
Техн. редактор. *К. М. Шалимова*

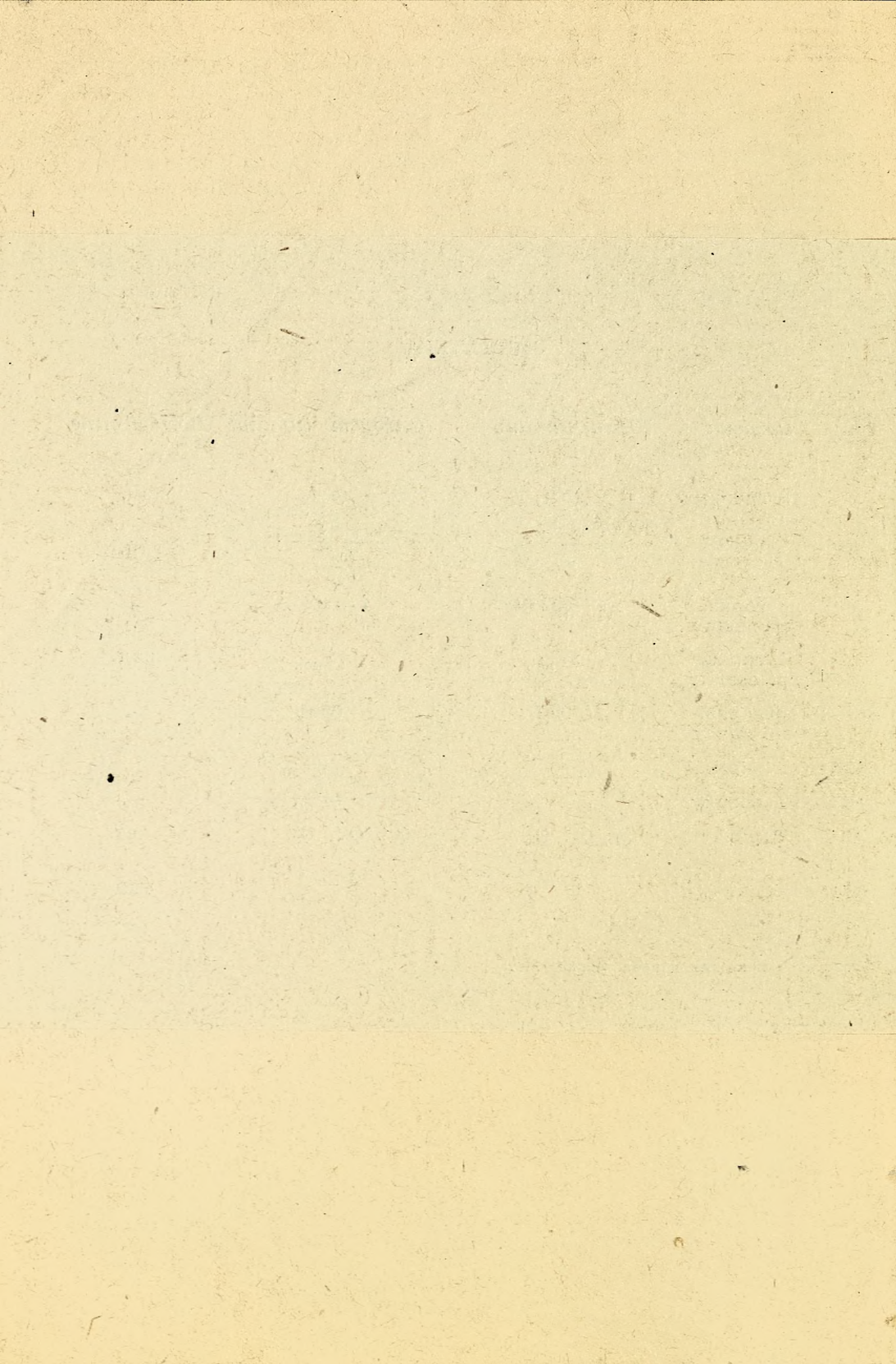
Учетн. № 3433. Изд. № 36. Индекс
МЧ-50-5-4-(3) Тираж 3.000. Сдано
в набор 13/VII 1936. Подп. в печ.
10/VIII 1936 г. Формат бумаги
62 × 94. Уч.-авт. л. 13. Бум. лист.
5⁷/₁₆. Печ. зн. в бум. листе 101.000.
Заказ № 1218. Уполном. Главлита
№ В—44948. Выход в свет сентябрь
1936 г.

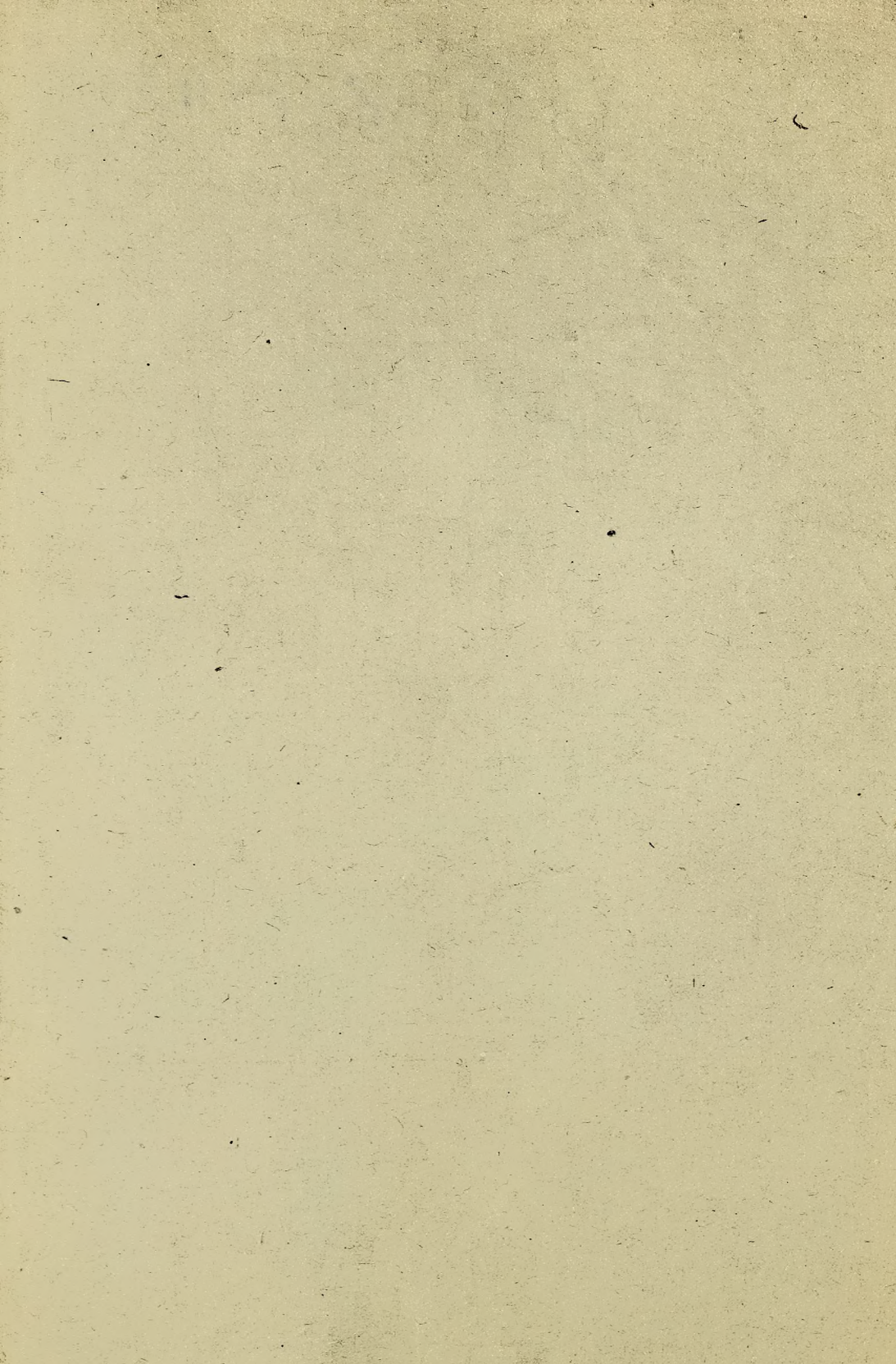
3-я типогр. ОНТИ им. Бухарина.
Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать	Почьей вине
56	13 сверху	до t_1	до t_2	изд.
61	2 снизу в формул.	$\frac{1 + \alpha t}{\gamma_0} 1$	$\frac{1 + \alpha t}{\gamma_0} - 1$	тип.
80	3 гориз. гр. снизу	$i = 926,1$	$i = 626,1$	"
86	4 гориз. гр. сверху	$W_{\text{нач}}$	$W_{\text{кон}}$	изд.
86—87	3 гориз. гр. снизу	000	0001	"
136	5 снизу	$I_s - I_a$	$I_s = I_a$	"
137	5 сверху	$- I_a$	$- I_o$	"
138	2 снизу	$Q_1, Q_2, Q_3 \dots$	$Q_1', Q_2', Q_3' \dots$	авт.
171	6 снизу	$\Delta = \frac{D}{D}$	$\Delta = \frac{D}{D,}$	тип.

Сушилка и сушила для дерева. Заказ 1218.





Цена с атласом 14 р. 75 к.

6108