

ПРОФ. С. В. ЛЕБЕДЕВ и инж. В. Н. СТАБНИКОВ

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ТИПА СУШИЛА ДЛЯ СВЕКЛОВИЧНОЙ СТРУЖКИ

— и —

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА



ТОМСК

1928

К вопросу о выборе типа сушила для свекловичной стружки и основные положения расчета.

I. Условия высушивания сахарной свеклы.

Проблема сушения свеклы за последние годы подверглась довольно оживленному обсуждению в нашей специальной периодической печати. Значительная часть появившихся работ относится к выяснению вопроса о потерях сахара при сушении и к нахождению таких условий высушивания, при которых потери сахара были бы минимальны. Наряду с оригинальными работами имеется целый ряд рефератов работ и официальных отчетов, касающихся, главным образом, работы итальянских заводов, перерабатывающих сушеную свеклу по способу де-Векки.

Этими работами вопрос о наиболее благоприятных условиях высушивания сахсвеклы можно считать в значительной степени разрешенным.

Исследователи, работавшие по вопросу о высушивании свеклы до де-Векки, не имели успеха, главным образом, потому, что применяемые ими температуры ограничивались величиной $50-60^{\circ}\text{C}$. Де-Векки дал новый импульс к продвижению проблемы сушения свеклы в направлении ее технического осуществления. Он нашел, что при соблюдении найденных им условий сушки, при применении температур, лежащих выше 100°C , не наблюдается потерь сахара ни вследствие образования инверта, ни вследствие карамелизации. Исследователи, обследовавшие работу по способу де-Векки непосредственно на итальянском сахзаводе в Лорео, пришли (11) к следующим выводам:

1. Никакого образования инвертного сахара или потери сахарозы в течение всего процесса высушивания свекловичной резки не наблюдается.

2. Выход кристаллического сахара вполне нормален. Другие исследователи (проф. Mezzadrolì, d-r Frigerio) в своих работах показали, что указанные выводы верны.

В докладе (11) Английского министерства земледелия о результатах работы по способу де-Векки опытной установки в Eynsham авторы доклада приходят к выводу: „при нагреве до 110°C в высушенной свекле не было обнаружено образования инвертного сахара или признаков карамелизации; найдено было весьма существенным увеличить скорость высушивания для того, чтобы влажный материал не подвергался более или менее значительному нагреву. При продолжительности процесса сушения до одного часа или менее получались значительно лучшие результаты“. В этом же докладе отмечается опасность повышения температуры сушки выше 110°C . Лабораторные работы инж. Бенина по вопросу о высушивании свеклы (10) установили в отношении температуры и продолжительности сушения следующее:

1. „При прочих равных условиях потеря сахара при высушивании тем большая, чем продолжительней процесс сушки“.

2. „Высушивание возможно вести при температурах выше 100°C , но при этом необходимо тщательно следить за состоянием стружки в сушильном аппарате“.

Таким образом, на основании вышеуказанного можно принять, что вопрос о применении высоких температур (выше 100°C) при соответствующих условиях сушения решается в положительном смысле.

Процесс сушения в работающей сушилке в Лорео, как это не раз отмечалось в печати, (6, 8, 11, 12) в главнейшем сводится к следующему. Сушило представляет прямоугольную камеру длиною по наружным размерам 12,2 мт., шириной 3 мт. и высотой 7 мт. Сушильная камера по высоте разделена воздушным каналом на две части. В каждой части помещено по три горизонтальных ленточных транспортера из материала, легко пропускающего воздух. Свежая стружка попадает на верхний транспортер, который проходит в 20 минут. Следующие пять транспортеров проходятся стружкой со скоростью вдвое меньшей, т. е. в 40 минут каждый.

Удаляется стружка при 90°C из нижней части сушилки. Обогревание и высушивание стружки производится воздухом с температурой от 90° до 130°C . Последовательность нагрева такова: нагретый до 90°C воздух, в количестве 142 куб. мт. в минуту, поступает в нижнюю часть сушилки и движется снизу вверх навстречу стружке. Далее воздух попадает в нижнюю воздушную камеру, откуда вентилятором отсасывается. К этому воздуху добавляется еще 368 куб. мт. воздуха извне и весь этот нагретый до 130°C воздух вдувается в верхнюю часть сушилки (6). Далее воздух опускается вниз, следуя движению стружки, и попадает в верхнюю воздушную камеру, откуда выходит наружу при 110°C . Нагревание стружки и удаление из нее 75% воды происходит в верхней части сушилки, а в нижней его части идет досушивание, при чем удаляется всего 2,5% воды по весу сырой свеклы. Специальные топki, в которых подогревался воздух, отапливались нефтью, расход которой составлял 8,54% по весу свеклы. Комиссия, из доклада (12) которой заимствованы эти данные, отмечает, что рассмотренная сушка запроектирована не вполне удачно. Авторы доклада высказывают надежду на уменьшение расхода топлива при рационализации способа сушения.

II. Диаграмма проф. Рамзина.

Вопрос о наиболее экономичном варианте сушильного процесса представляет значительный интерес. Независимо от конструкции сушилки, в том случае, если последняя технически правильна, применение того или иного принципа использования тепла может обеспечивать большую или меньшую степень экономичности высушивания.

Теоретический анализ различных вариантов сушильного процесса дан проф. Рамзиным (1) в статье „Расчет сушилок и J-d диаграмма“. В этой работе разобрано три варианта нормального сушильного процесса. В этой же работе описана предложенная проф. Рамзиным J-d диаграмма, значительно упрощающая расчеты, связанные с сушилками, работающими нагретым воздухом. Кроме того, J-d диаграмма позволяет весьма наглядно представить процесс сушения. Предполагая, что широким кругам упомянутая работа еще мало известна, ниже даются краткие сведения о J-d диаграмме, в тех пределах, в каких это нужно для последующего изложения. На диаграмме проф. Рамзина

за оси координат взяты: влагосодержание d в граммах на один килограмм сухого воздуха (горизонтальная ось) и теплосодержание J влажного воздуха в калориях на 1 кг. сухого (вертикальная). Расчеты произведены для барометрического давления 745 мм. ртутного столба. Это давление взято, как близкое к среднему годовому давлению Центрального промышленного района С.С.С.Р.

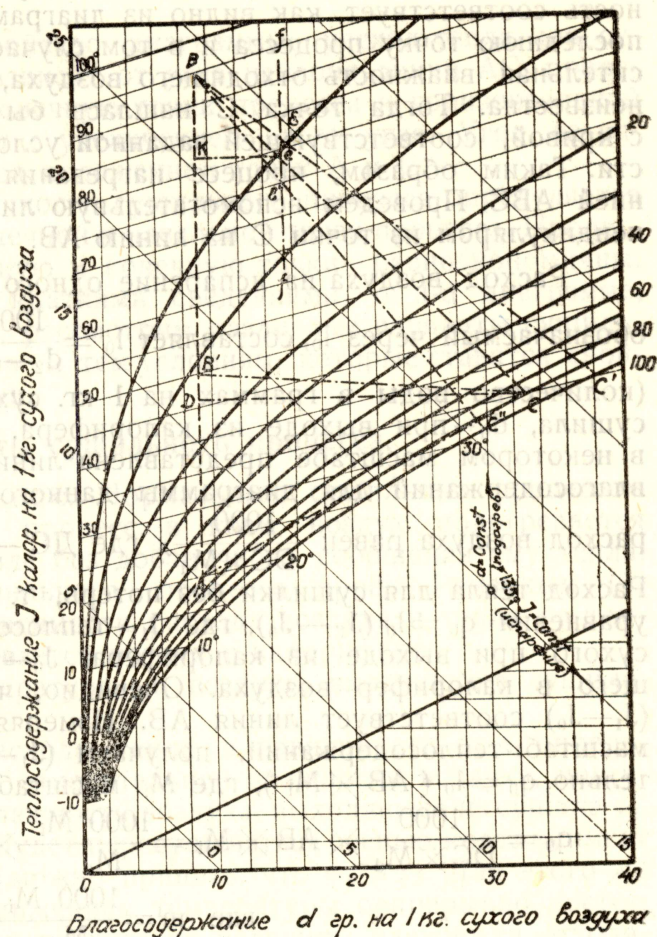
Угол между линиями $J = \text{const.}$ и $d = \text{const.}$ принят равным 135° . (чертеж 1). В этих координатах построены изотермы, представляющие линии, близкие к прямым, и кривые постоянной степени насыщения. Кривая внизу диаграммы дает парциальное давление водяного пара в смеси, в зависимости от влагосодержания. Способ пользования диаграммой уясняется примером, приведенным ниже.

Пример: Найти расход воздуха и тепла на испарение одного килограмма воды, если воздух нагревается в калорифере до $95,0^\circ\text{C}$, его начальная температура 20°C и влажность 60% , а конечная температура 35°C . Допустим, что сушение идет без бесполезных потерь, которые обозначены через Δ , т. е. допустим, что $\Delta = 0$. Найдем на диаграмме точку, отвечающую состоянию наружного воздуха. Это будет точка А, где пересекаются линии $\varphi = 60\%$ и изотерма для 20°C . При нагревании этого воздуха в калорифере, перед впуском в сушильную камеру, его влагосодержание d (что находим, опуская перпендикуляр из точки А на горизонтальную ось) не изменяется. Меняется лишь температура. Следовательно, процесс нагревания изобразится линией АВ, параллельной вертикальной оси.

Состояние воздуха при выходе из калорифера на диаграмме изобразится точкой В пересечения линии АВ с изотермой для $95,0^\circ\text{C}$. Нагретый воздух поступает в сушило. Для сушилки, в которой $\Delta = 0$, количество тепла в воздухе за все время сушения остается постоянным. Происходит только перераспределение тепла. Теплосодержание воздуха, поступившего из калорифера уменьшается, за счет чего испаряется вода. Общее же теплосодержание смеси остается постоянным и равным первоначальному теплосодержанию воздуха, поступившего из калорифера. На диаграмме этот процесс испарения влаги за счет охлаждения воздуха, поступившего из калорифера, изобразится линией

J-d диаграмма

проф. П.Х. Рамзина



Черт. 1

BC, для которой $J = \text{Const}$. Конечная же точка процесса изобразится на диаграмме пересечением линии BC и изотермы для 35°C . Влаго-содержание одного килограмма сухого воздуха найдем, проведя из точки C перпендикуляр на горизонтальную ось. Относительная влажность соответствует, как видно из диаграммы, 90% . Можно получить последнюю точку процесса и в том случае, если бы была задана относительная влажность отходящего воздуха, а температура его была бы неизвестна. Тогда точка C нашлась бы на пересечении линии BC с кривой, соответствующей заданной условию относительной влажности. Таким образом, процесс нагревания и сушения изобразится линией ABC. Проведем вспомогательную линию CD, которая будет перпендикуляром из точки C на линию AB.

Расход воздуха на испарение одного килограмма (1000 гр.) воды, обозначаемый через l_0 , составляет $l_0 = \frac{1000}{d_2 - d_0}$, где d_2 влажность воздуха

(количество воды в граммах на 1 кг. сухого воздуха) при выходе из сушила, d_0 — при выходе из калорифера. На диаграмме эта разность в некотором масштабе представлена линией DC. Обозначим масштаб влагосодержаний для диаграммы данного размера через M_d . Тогда расход воздуха равен $\frac{1000}{DC \times M_d}$, где DC — измеряется в миллиметрах.

Расход тепла для сушки без потерь, т. е. при $\Delta = 0$, находится из уравнения $q_0 = l_0 (J_1 - J_0)$, где J_1 — теплосодержание воздуха на 1 кг. сухого при выходе из калорифера, J_0 — теплосодержание поступающего в калорифер воздуха. Очевидно, что на диаграмме разности $(J_1 - J_0)$ соответствует линия AB. Измеряя ее в мм. и умножая на масштаб теплосодержаний, получаем $(J_1 - J_0)$ в калориях. Следовательно, $q_0 = l_0 (AB \times M_i)$, где M_i масштаб теплосодержаний. Отсюда

$$q_0 = \frac{1000}{DC \times M_d} \times AB \times M_i = \frac{1000 M_i}{M_d} \times \frac{AB}{DC} \text{ или } q_0 = m \frac{AB}{DC}$$

$$\text{где } m = \frac{1000 M_i}{M_d}.$$

Пользуясь этими соотношениями, весьма просто находить расход воздуха и тепла на 1 кг. испаряемой в сушилке воды.

Расчет сушилки, где Δ не может быть принято равным нулю, несколько осложняется. Условимся, что Δ есть количество тепла, теряемое или сообщаемое паровоздушной смеси в сушилке, отнесенное на 1 кг. испаренной в сушилке влаги. Решим разобранный выше пример, осложнив его условия тем, что $\Delta > 0$, т. е., что в сушилке паровоздушной смеси сообщается некоторое количество тепла на каждый кг. испаряемой влаги. Очевидно, что луч (черт. 1), на котором будет лежать конечная точка сушильного процесса, займет при указанном условии иное положение, при чем, так как теплосодержание смеси будет теперь выше, чем в первом случае, когда $\Delta = 0$, новый луч пройдет выше луча BC. Правило нахождения, по Рамзину, положения нового луча BC₁ следующее: (см. черт. 1) „На луче BC, идущем из точки B, параллельно линии $J = \text{const}$, выбираем произвольную точку e; из e проводим ef перпендикулярно горизонтальной оси ординат и откладываем вверх отрезок eE, равный $ek \frac{\Delta}{n}$ мм. [(1), 26 стр.], где ek —

длина перпендикуляра из e на AB в мм., n — коэффициент, зависящий от масштаба диаграммы“. „Соединяя точки B и E, мы получим искомый луч, на котором лежит искомая точка C конца процесса“. Если бы

Δ было менее нуля, т. е., если бы потери в сушиле превосходили добавочно вводимое тепло, построение нового луча было бы то же самое, но с той лишь разницей, что отрезок откладывается в этом случае не вверх, а вниз и, следовательно, новый луч займет положение ниже луча ВС (черт. 1).

Отметим еще одно свойство диаграммы: расход тепла для сушки без потерь ($\Delta = 0$) зависит от угла наклона линии АС, проведенной через начальную и конечную точки процесса к горизонтальной оси. Расход тепла возрастает с увеличением этого угла. Угол же наклона линии АС определяется положением точек А и С.

Следовательно, экономичность сушильного процесса определяется взаимным расположением конечной и начальной точек процесса. Процессы, имеющие общую начальную и конечную точки—равноэкономичны.

Ограничиваясь этими краткими сведениями о J-d диаграмме, в дальнейшем, пользуясь ею, рассмотрим различные варианты сушильного процесса применительно к тем условиям, которые ставятся свойствами свекловичной стружки.

III. Варианты сушильного процесса.

Нормальный процесс. Нормальным сушильным процессом проф. Рамзин (1) называет процесс, в коем воздух подогревается однажды и работает в сушиле без добавочного сообщения ему тепла.

Для нормального сушильного процесса проф. Рамзиным (1) установлены следующие зависимости расхода воздуха и тепла от температуры, до которой нагревается воздух в калорифере.

1. С повышением температуры— t_1 воздуха, входящего в сушило, расход его падает.

2. Закон изменения расхода тепла в зависимости от t_1 определяется отношением величин относительной влажности воздуха, поступающего в калорифер φ_0 и влажности воздуха, выходящего из сушила φ_2 . В обычных условиях свекла будет пересушиваться осенью, когда φ_0 имеет большое значение. Поэтому можно принять, что $\varphi_0 > \varphi_2$. Для этого же случая расход тепла с понижением температуры непрерывно растет. Зависимость расхода тепла и воздуха от величины влажности отходящего воздуха формулируется проф. Рамзиным (1) так: „С понижением φ_2 расход воздуха l_0 и тепла q_0 быстро возрастает“. Отсюда ясно, что для осуществления в таких условиях ($\varphi_0 > \varphi_2$) наиболее экономичного, нормального сушильного процесса необходимо взять максимальную допустимую для данного материала температуру и максимальную влажность отходящего воздуха. Максимальная температура, допустимая при сушении свеклы, как указано выше, может быть принята в $130^\circ \text{C}.$ *) Что касается максимальной относительной влажности, то она может быть принята равной 70%, так как при более высоком ее значении, при местном понижении температуры в каком-либо уголке сушилки, возможно „распаривание“ продукта (2). При таких условиях расход воздуха и тепла на 1 кг. испаренной влаги составляет $l_0 = 29$ кг.

$$q_0 = 900 \text{ кал.}$$

и для 1 кг. свеклы, при условии, что из нее испаряется 75% воды по весу этой свеклы: $l_1 = 21,8$ кг.

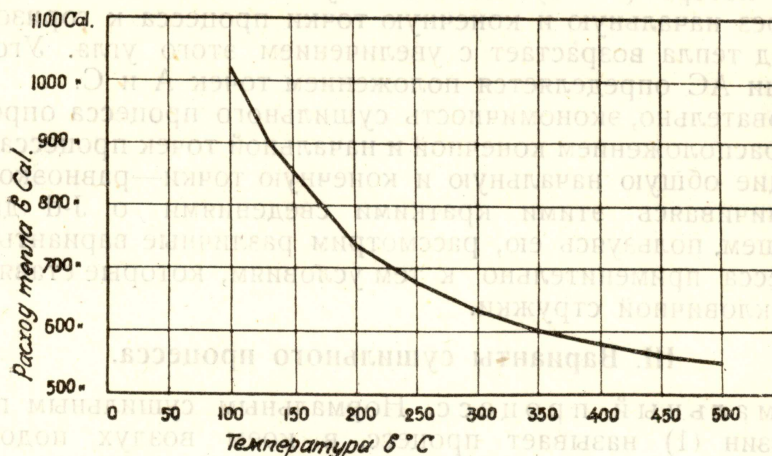
$$q_1 = 675 \text{ кал.}$$

Таким образом, предельная экономичность нормального сушильного процесса для свекловичной сушилки отвечает расходу тепла на 1 кг. свеклы 675 кал. для сушилки, где $\Delta = 0$.

*) В последних стадиях высушивания темпер. д. б. понижена, но для простоты примем, что $t_1 = \text{const.}$ и равна 130°

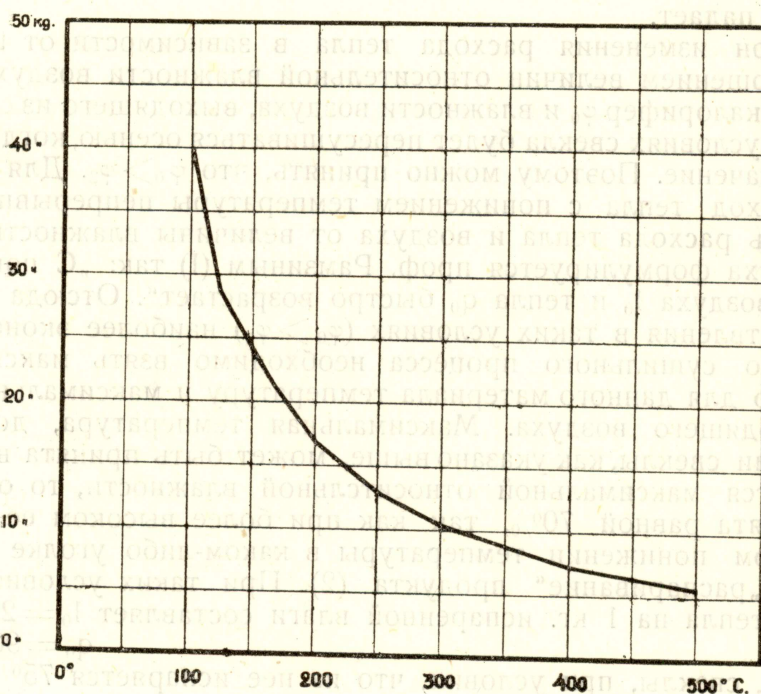
Повышая температуру нагрева воздуха (если бы сушимый материал допускал это), мы могли бы получить более экономичный процесс.

ЗАВИСИМОСТЬ
расхода тепла
на испарение 1 кг. воды от величины t .



Черт. 2

РАСХОД ВОЗДУХА
кг. на 1 кг. испаряемой воды в зависимости от t .



Черт. 3

На диаграммах чертежей 2-го и 3-го даны изменения расхода тепла и расхода воздуха на 1 кг. воды, испаряемой в сушилке без потерь, в зависимости от температуры воздуха, поступающего в сушило. Относительная влажность отходящего из сушила воздуха принята при вычислении равной 70%, поступающего в калорифер—90%. Температура

воздуха, поступающего в калорифер, равна 0°C . Из диаграмм видно, что с повышением температуры количество затрачиваемого на 1 кг. испаряемой воды, тепла и воздуха падает вначале весьма интенсивно. С переходом в область температур выше 450°C ., темп изменения расхода тепла и воздуха замедляется; кривая в дальнейшем своем развитии приближается по характеру к прямой, слабо наклоненной к горизонту. Повышение температуры за пределы $450\text{--}600^{\circ}\text{C}$., даже значительное, уже не дает большого эффекта в отношении уменьшения расхода тепла и воздуха. Однако, и эти температуры являются недопустимыми при сушении сах. свеклы, в силу разрушительного действия по отношению к сахару. Таким образом, задача экономического высушивания свеклы сводится к тому, чтобы, не повышая температуры за пределы, допустимые для свеклы, т. е. выше 130°C ., провести процесс высушивания равноэкономичным, хотя бы, процессу с температурой, равной 450°C . Очевидно, на основании предыдущего, что такой процесс, независимо от характера его протекания, должен иметь начальную и конечную точки те же, что и при процессе с температурой 450°C . Современная техника сушения имеет в своем распоряжении несколько методов повышения экономичности процесса высушивания при сохранении низких температур сушения.

Сюда относятся следующие варианты нормального сушильного процесса:

1. Сушилка с непрерывным подогревом воздуха в сушильной камере.

2. Сушилка с периодическим подогревом воздуха либо в сушильной камере, либо вне ее.

3. Сушилка с возвратом отработанного воздуха.

Рассмотрим последовательно все три варианта.

В а р и а н т 1.—Допустим, что мы имеем задание осуществить различными путями, не поднимая t_1 выше 130° , процесс, равноэкономичный процессу с $t_1 = 450^{\circ}\text{C}$. Этот последний изобразится линией ABC (черт. 11). Конечная его точка C, начальная A. Выше мы видели, что, вводя в сушило добавочное тепло, можно изменить направление луча BC (черт. 1), при этом новый луч BC_1 займет положение выше BC. Исходя из этого, для достижения поставленной цели, можно поступить так: нагреем воздух в калорифере до 130°C и впусим его в сушильную камеру. Процесс изобразится линией AB_1C_1 (черт. 11). Введя добавочное тепло в сушило, изменим направление луча B_1C_1 . При этом, при последовательном увеличении вводимого тепла, луч B_1C_1 вращается вокруг точки B_1 по направлению против часовой стрелки. При некотором определенном количестве сообщаемого в сушиле тепла луч B_1C_1 совместится с лучем B_1C , т. е. процесс будет иметь общие, и начальную и конечную, точки с процессом, для которого $t_1 = 450^{\circ}\text{C}$. Этот вариант сушильного процесса изобразится на диаграмме линией AB_1C . Как видно, он протекает при температурах не выше 130°C .

В а р и а н т 2.—Мы могли бы притти в ту же точку C (черт. 11), ведя процесс так, как это показано линией $AUFSPONML\ldots C$, т. е. нагревая воздух в первом калорифере до температуры не свыше 130°C и впуская его в рабочее пространство сушила. Охладившийся в нем за счет испарения воды воздух вновь нагревается и вновь впускается в рабочее пространство. Одинаковый для всех ступеней расход

воздуха, как и раньше, равен: $l_0 = \frac{Md \text{ кг.}}{DC \text{ кг.}}$. Расход тепла в отдельных калориферах составляет $\frac{Au}{DC}m$; $\frac{FS}{DC}m$; $\frac{PR}{DC}m$ и т. д., где $m = \frac{Md}{Mi}$

Промежуточный нагрев воздуха может производиться или вне сушила в специальных калориферах, или же в самой сушилке соответственно расположенными поверхностями нагрева, как это сделано в предложенных проф. Грум-Гржимайло (2,3) сушилах с многократной циркуляцией воздуха. Как видно из диаграмм, при том же наклоне линии АС, что и для процесса с температурой 450°С, следовательно, при равной затрате тепла максимальная температура процесса равна 130°С. Мы можем провести процесс самыми разнообразными путями, варьируя температуру промежуточных подогревов и степени насыщения воздуха в различных камерах сушила. Если принять, что температура впускаемого после подогрева в рабочее пространство воздуха всегда равна $t_{\max}$ и что температура поступающего в каждый промежуточный калорифер воздуха равна $t_{\min}$, то для определения количества промежуточных подогревов приложима формула проф. Грум-Гржимайло (2,3).

$$Q = \frac{a}{b} \left[\left(1 + \frac{b}{\lambda_{\min}} \right)^n - 1 \right] \dots \dots \dots (1)$$

где n — число подогревов.

„ a — $(t_{\max} - t_{\min}) \times 0,2375$ кал.

„ — 0,2375 теплоемкость воздуха.

$b = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$

„ $\lambda_{\max}$ — полное теплосодерж. пара при $t_{\max}$.

„ $\lambda_{\min}$ — полное теплосодерж. пара при $t_{\min}$.

„ Q — содержание паров воды в 1 кг. отработавшего воздуха при принятой величине относительной влажности и температуре ($t_{\min}$) отходящего воздуха.

Уравнение (1) после логарифмирования и соответствующих преобразований принимает вид:

$$n = \frac{\lg (1 + 1,284 Q)}{\lg \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}} \dots \dots \dots (2)$$

Зададимся температурой $t_{\max}$ и $t_{\min}$ и найдем соответствующие им $\lambda_{\max}$ и $\lambda_{\min}$. Подставляя их в уравнение (2), легко найдем число подогревов, необходимых для достижения содержания воды Q кг. в 1 кг. отходящего из сушила воздуха.

Вариант 3.—Сушилка с возвратом отработавшего воздуха. В этом случае часть отработавшего воздуха выпускается в атмосферу, другая же смешивается с свежим воздухом и, подогреваясь, вводится вновь в сушило. Анализируя различные случаи, представляемые этим вариантом, проф. Рамзин (1) приходит к выводу: „Возврат последнего (воздуха) в большинстве случаев дает незначительную экономию, ибо большая экономия получается только при необычно низкой относительной влажности отходящего из сушилки воздуха“. Однако, возврат отработавшего воздуха получил широкое применение в технике сушения в тех случаях, когда впускаемый в сушилку воздух должен быть увлажнен. Так как опыт сушения свекловичной резки показал, что сушение ее протекает хорошо без увлажнения воздуха, то этот вариант сушильного процесса нами рассматриваться не будет.

IV. Обзор сушилок.

Описанная выше сушилка в Лорео работает, осуществляя нормальный сушильный процесс почти в чистом виде.

В самом деле, главная масса воздуха—368 куб. мт., подаваемых в минуту, подогревается только однажды. Остальные 142 куб. мт. подогреваются два раза, т. е. только третья часть воздуха работает в про-

процессе с одним промежуточным подогревом. Таким образом, сушилкой, установленной в Лорео, не используются в должной мере ни одна из возможностей, позволяющих увеличивать экономичность процесса высушивания, не поднимая температуры нагрева воздуха выше предельной для сушки сах. свеклы. На основании предыдущего совершенно ясно, в каком направлении необходимо производить конструктивные изыскания для того, чтобы создать экономический процесс сушения.

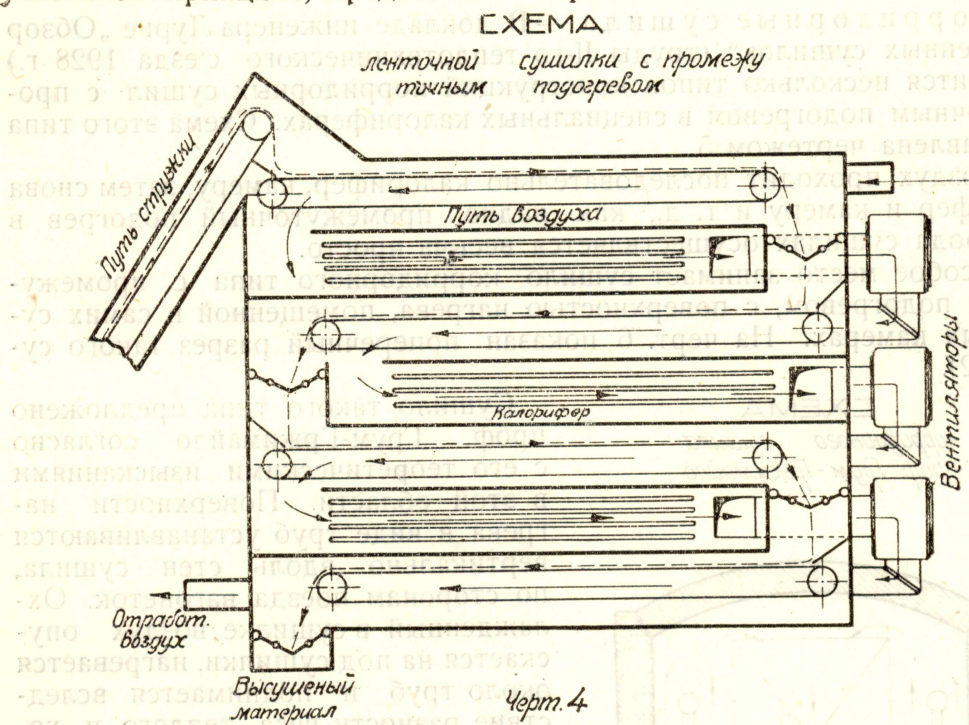
В этих целях необходимо применить для сушения свекловичной резки сушила с подогревом воздуха.

В этой работе мы не будем рассматривать сушил, в которых подогрев воздуха производится непрерывно. Мы остановимся на сушилах с периодическим, повторным подогревом воздуха, при чем из всего многообразия конструкций сушил мы рассмотрим только два типа, получивших распространение в промышленном сушении крупного масштаба таких с.-х продуктов, как овощи и крахмал, именно:

1. Корридорные или канальные сушила,
2. Ленточные сушила.

Оба указанных типа допускают применение периодического (промежуточного) подогрева воздуха. Рассмотрим ниже схемы конструкций таких сушил.

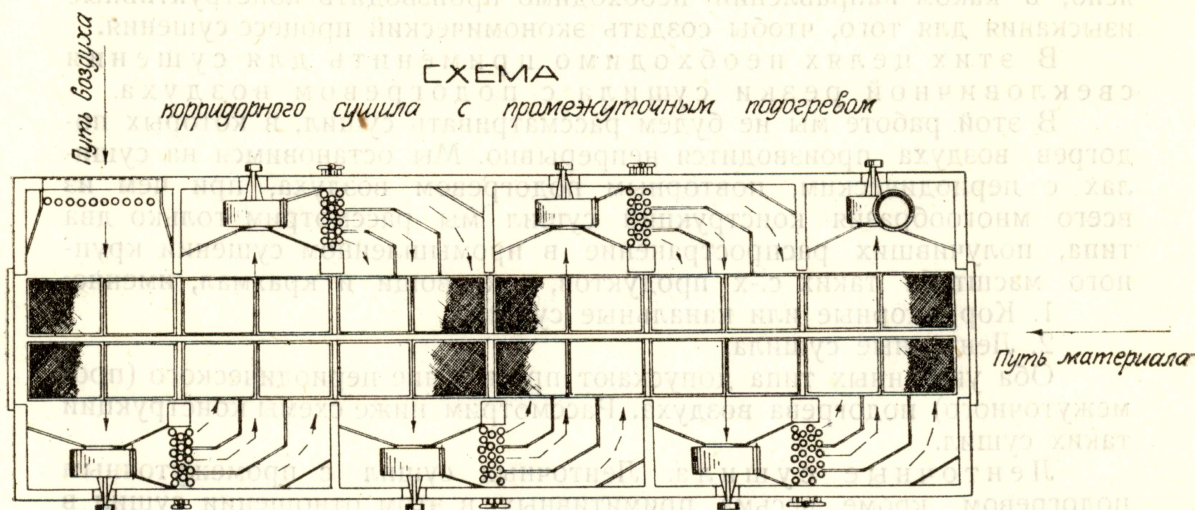
Ленточные сушила. Ленточных сушил с промежуточным подогревом, кроме весьма примитивных в этом отношении сушил в Лорео, нам не встречалось. Схема действия сушилки, построенной на указанном принципе, представлена чертежом 4.



Воздух, нагретый в калорифере, идет вдоль пасса в направлении его движения или против; в месте перехода сушеного материала с пасса на пасс воздух должен быть отделен и направлен в подогревательную камеру.

Подогревательные приборы располагаются вне сушильных камер, как это показано на схеме. Но могут быть расположены и так, как это сделано в сушилах с многократной циркуляцией воздуха проф. Грум-Гржимайло (об этом см. ниже: корридорные сушила).

Производительность ленточного сушила может быть различной, в зависимости от размеров пассивов и напряжения сушильной поверхности, т.е. производительности единицы площади в единицу времени. Сушилка в Лорео имела производительность 12,5 цт. в час при продолжительности сушения 3 ч. 40 мин.

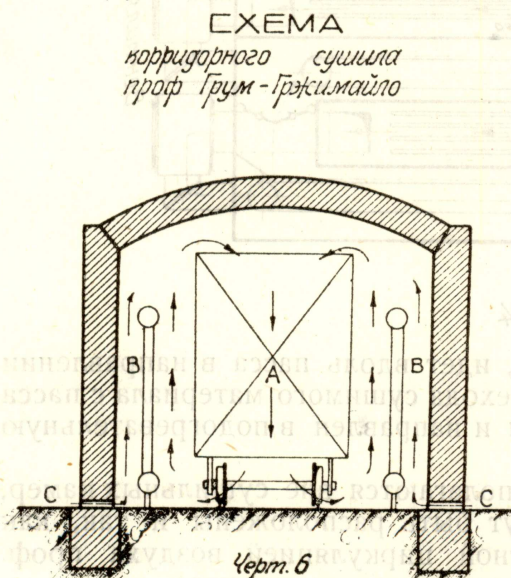


Черт. 5

Корридорные сушила. — В докладе инженера Лурье „Обзор современных сушилок“ (труды II-го теплотехнического съезда 1928 г.) приводятся несколько типов конструкций корридорных сушил с промежуточным подогревом в специальных калориферах. Схема этого типа представлена чертежом 5.

Воздух проходит последовательно калорифер, камеру, затем снова калорифер и камеру и т. д., как видно, промежуточный подогрев в этого рода сушилах осуществляется весьма просто.

Особое место занимает сушило корридорного типа с промежуточным подогревом, с поверхностью нагрева, помещенной в самих сушильных камерах. На черт. 6 показан поперечный разрез такого сушила (2).



Черт. 6

Сушило такого типа предложено проф. Грум-Гржимайло согласно с его теоретическими изысканиями в этой области. Поверхности нагрева в виде труб устанавливаются вертикально вдоль стен сушила, по сторонам проезда вагонеток. Охлажденный в сушилке воздух опускается на под сушилки, нагревается около труб и поднимается вследствие разности веса теплого и холодного воздуха вверх. Снова опускается, проходя через сетчатые решетки и сушимый материал, вновь нагревается и т. д.

Производительность канального сушила может быть весьма различной, однако, можно приблизительно, исходя из конструктивных

соображений и из данных практики, определить среднюю величину их производительности. Основным элементом сушильной поверхности в канальном сушале представляет сито; ряд сит помещается одно над другим на вагонетку, движущуюся по каналу. Размеры сита для различных сушилок приведены в таблице 1-ой (4,5).

Таблица 1.

Наименование сушил	Размер сита в метрах
Шкафно-канальная сушилка системы инженера Ягна	$1,1 \times 0,75$
Канальная системы Герцога	$1,4 \times 1,4$
Камерная Гезейгеймская	$0,75 \times 0,75$
Канальная Лемана	$1,25 \times 1$

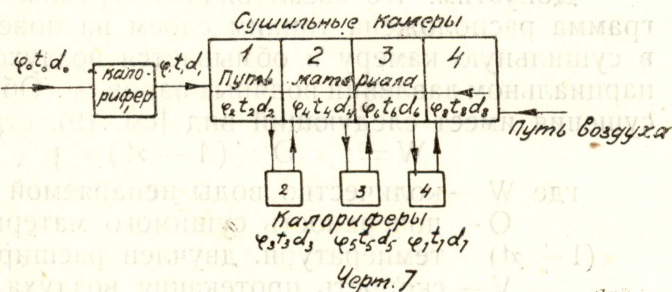
На основании данных таблицы 1-ой, можно принять площадь поверхности сита, равной 2 кв. мт. Эта величина будет отвечать максимальной из приведенных поверхностей одного сита.

Если принять, что каждая вагонетка несет 10 сит, то при этих условиях одна вагонетка вместит 20 кв. мт. поверхности, на которой располагается сушимый материал. Примем число вагонеток равным 10. Тогда общая поверхность сушения равна $20 \times 10 = 200$ кв. мт. Если продолжительность сушения равна 1 ч. 30 мин. (время нахождения стружки в верхней камере сушилки в Лорео), то поверхность сушения будет использована в течение суток $24 : 1\frac{1}{2} = 14,4$ раз. Примем нагрузку на 1 кв. мт. поверхности такой же, как для сушилки в Лорео, т.е. 14,5 кг. сырой свеклы. Тогда суточная производительность сушилки указанных размеров составит $14,4 \times 200 \times 14,5 \cong 42000$ кг. или 420 мт. цн., что отвечает 17,5 мт. цн. в час, считая на свежую свеклу. Корридорная сушилка, как мы видели выше, позволяет весьма просто в конструктивном отношении применить принцип промежуточного подогрева, поэтому она наравне с ленточной заслуживает полного внимания.

Рассмотренные выше сушилки по своей производительности пригодны для промышленной сушки свекловичной резки. Те и другие, при соответствующей конструкции и применении вышеуказанного принципа повторного подогрева, могут дать дешевый и доброкачественный продукт. Не имея эксплуатационных цифр, трудно сказать, какому типу следует отдать предпочтение. Однако, исходя из соображений о простоте конструкции, можно отметить, что корридорные сушилки имеют некоторое преимущество.

Ниже мы остановимся на методе расчета сушилки того и другого типа с повторным подогревом вне сушильной камеры в специальных калориферах.

Схема сушилки с промежуточным подогревом работающего воздуха представлена на чертеже 7. Как видно из чертежа, воздух подогревается в калорифере первом и поступает в первую сушильную камеру, затем вновь нагревается и т. д.



На чертеже даны характеристики воздуха при выходе из каждой камеры и калорифера. Обозначения следующие:

φ —относительная влажность воздуха.
 d —абсолютная влажность его (количество воды на 1 кг. сухого воздуха).

t —температура воздуха.

Как мы видели выше, выяснение расхода воздуха и тепловой расчет сушила весьма прост, если мы умеем изобразить его в J — d диаграмме. Для изображения же его необходимо знать: 1) начальное состояние воздуха; 2) температуру нагрева воздуха в каждом калорифере; 3) температуру или влажность отходящего из камеры воздуха. Условиями, обычно известными при практическом решении задачи, являются начальное состояние воздуха и температуры нагрева. Следовательно, остается найти способ нахождения 3-го условия, а именно—температуры или влажности отходящего из каждой камеры воздуха.

Состояние воздуха, отходящего из какой-либо камеры, в теоретической сушилке, где $\Delta = 0$, определяется количеством испаренной воды. Последнее же зависит от скорости высушивания в данной камере. Поэтому для того, чтобы достаточно точно нанести сушильный процесс на J — d диаграмму, нужно выяснить характер течения процесса сушения сахарной свеклы в зависимости от времени, иначе говоря, это значит—заняться вопросом о динамике сушения сахарной свеклы.

V. Динамика сушения сахарной свеклы.

Вопрос о динамике сушения различных водосодержащих материалов представляет почти незатронутую область (21, 22). Вопрос о динамике сушения сахарной свеклы также до сих пор почти не исследовался. Имеющийся в литературе скудный материал касается только общей длительности высушивания, при чем не учитывается значение отдельных факторов, влияющих на время сушки. Имеется экспериментальная работа, в которой сделана попытка дифференцировать процесс сушения свеклы (13). Работа эта, произведенная в лаборатории технологии питательных веществ Сибирского Технологическ. Института проф. С. В. Лебедевым и Н. Г. Забегаловым, касается скорости высушивания свекловичной стружки и содержит несколько опытов высушивания, произведенных при различных температурах.

Желая найти закон изменения скорости высушивания свекловичной стружки, мы ниже подошли к этому вопросу теоретически и получили известную зависимость, выражаемую некоторой кривой. Сравнивая последнюю с кривой, построенной на основании экспериментальных данных, при тех же условиях мы могли проверить степень пригодности применяемого способа теоретического нахождения кривой скорости высушивания для практических целей и ввести необходимые поправки.

Допустим, что свекловичная стружка в количестве одного килограмма расположена тонким слоем на поверхности сита, помещенного в сушильную камеру и обмывается воздухом с температурой t^0 , при парциальном давлении водяных паров l_b . Общее уравнение для скорости сушения имеет следующий вид [см.: (9), стр. 78]:

$$W = f \times O \times (1 + \alpha t) \times \sqrt{v} \times (l_w - l_b) \dots (3)$$

где W —количество воды испаряемой в единицу времени.

O —поверхность сушимого материала.

$(1 + \alpha t)$ —температурн. двучлен расширения.

V —скорость протекания воздуха.

l_w — давление паров воды на поверхности высушиваемого тела.
 f — коэффициент скорости высушивания, зависящий от характера высушиваемого материала.

При постоянной температуре сушения, при неизменности скорости и характера сушимого материала можно принять член $f(1 + \alpha t) \sqrt{v}$ постоянным по величине. Обозначим его через C

$$C = f(1 + \alpha t) \sqrt{v} \dots \dots \dots (4)$$

Тогда количество воды, удаляемой в единицу времени, определяется выражением:

$$W = C \times O \times (l_w - l_b) \dots \dots \dots (5)$$

Количество же воды Q , удаленной за время Z , выразится так:

$$Q = Z \times W = Z \times C \times O \times (l_w - l_b) \dots \dots \dots (6)$$

Разобьем процесс высушивания на ряд периодов, которые возьмем такой длительности, что в каждый из них будет испарено 50% от первоначального веса сушимого материала. В нашем случае 50% составляет 50 грамм воды. Тогда уравнение (6) примет для ряда последовательных периодов вид:

$$\begin{aligned} \text{для 1-го} \quad 50 &= C \times Z_1 \times O_1 \times (l_{w1} - l_{b1}) \\ \text{„ 2-го} \quad 50 &= C \times Z_2 \times O_2 \times (l_{w2} - l_{b2}) \\ \text{„ n-го} \quad 50 &= C \times Z_n \times O_n \times (l_{wn} - l_{bn}) \dots \dots \dots 7. \end{aligned}$$

Решая это уравнение относительно Z_n , найдем

$$Z_n = \frac{50}{C \times O_n (l_{wn} - l_{bn})} \dots \dots \dots (8)$$

где Z_n время, в течение которого испаряются n -ые 50 грамм воды. Очевидно, что время Z_n меняется в зависимости от величины поверхности (O) сушеной свекловичной стружки и разности $(l_w - l_b)$, которые имеют неодинаковое значение для разных периодов сушения. Если принять, что средняя влажность воздуха постоянна за все время высушивания, то парциальное давление водяного пара можно считать постоянным. В уравнении (8) тогда будут переменными только O и l_w ; обе эти величины уменьшаются в течение процесса сушения. Площадь поверхности высушиваемого материала (O) с удалением воды непрерывно уменьшается. Давление паров воды (l_w) с удалением воды из сока и с повышением концентрации сахара в нем. стремится к некоторой минимальной величине, соответствующей давлению паров насыщенного при данной температуре раствора. Отсюда ясно, что в течение процесса сушения скорость его должна непрерывно уменьшаться.

Произведем подсчет длительности отдельных периодов времени $Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_n$, необходимых для испарения последовательных 50 грамм воды из одного кило свекловичной стружки.

Будем принимать при вычислении Z для значений l_w и O среднее их значение для данного периода высушивания. Найдем сначала, как изменяется во время сушки площадь поверхности стружки.

Сделаем допущения:

1. Сечения стружки плоскостью, перпендикулярной ее оси, в различные периоды от начала сушки, дают подобные фигуры.

2. Объем стружки уменьшается в каждом периоде на величину объема испаренной в этот период воды.

Обозначим длину стружки через l , площадь ее сечения через p , периметр сечения через k . Объем стружки (M) при призматической форме определяется так: $M = pl$ куб. см.

Площадь поверхности стружки — S , если не принимать во внимание концевых площадей, выразится так: $S = kl$ кв. см.

Возьмем отношение объема свеклович. стружки к ее площади, оно таково:

$$M:S = pl:kl = p:k$$

Отношение площади фигуры к ее периметру может быть легко определено для всякого случая. Для подобных же фигур это отношение сохранится при всех количественных изменениях. Однако, при вычислении отношения площади стружки к ее периметру необходимо учесть то обстоятельство, что стружка будет получаться различного сечения при различном взаимном расположении ножей в резке. Профессор Зуев в I томе своей „Энциклопедии Сахарной промышленности“ (135 стр.) приводит вычисления Голлера, который нашел, что, при изрезывании ножами Чижека (толщина стружки 1,5 мм.), на один кв.мм. площади приходится 1,6 мм. периметра. Для ножей Голлера то же отношение равно 2,35 мм. Выражая площади в кв. см. и длины в см., найдем для ножей Чижека $M:S=1:16$ см. Для ножей Голлера— $M:S=1:23,5$ см. Отсюда нетрудно, зная объем стружки, найти ее поверхность. Мы приняли, что объем стружки в каждом периоде уменьшается на объем испаренной за этот период воды. Если удельный вес стружки принять равным 1,00, то площадь одного кило стружки, изрезанной ножами Чижека будет отвечать: $S=M \times 16 \text{ см.}^2 = 1000 \times 16 \text{ см.}^2 = 1,6 \text{ кв. мт.}$, а для ножей Голлера 2,85 кв. мт. Это, конечно, справедливо только для определенной толщины (1,5 мм.) стружки. В общем случае мы имеем $S_0 = M \times b$, где b есть отношение $k:p$. В первый период, за который выпаривается 50 грамм воды, или 5% по весу сырой свеклы, объем уменьшается на 5% согласно с сделанным допущением. Соответственно и площадь уменьшится на 5%. При таких условиях имеем: площадь стружки в начале первого периода— S_0 , в конце $0,950 S_0$, в среднем— $0,975 S_0$. В начале 2-го периода $0,950 \times S_0$, в конце $0,900 \times S_0$, а в среднем— $0,925 \times S_0$ и т. д. При постоянной установке ножей S_0 имеет всегда одинаковое значение,—в таком случае в уравнении (4) можно принять, что $C_0 = S_0(1 + \alpha t) f \sqrt{v}$. Уравнение (5) примет вид: $W = C_0 U (l_w - l_b)$ (9) где— U есть численный коэффициент при S_0 , зависящий от стадии высушивания,—уравнение (8) выразится теперь так:

$$Z_n = \frac{50}{C_0 \times U_n \times (l_{w_n} - l_{b_n})} \text{ (10)}$$

Значения U_n для ряда последовательных периодов, за которые испаряется по 50 грамм, как мы видели выше, составляют арифметическую прогрессию:

0,975, 0,925, 0,875, 0,825 и т. д. При чем n -ый член этого ряда равен $U = 0,975 - (n - 1) 0,05$.

Тогда общее выражение для продолжительности высушивания n -ой порции в 50 грамм будет выражаться так:

$$Z_n = \frac{50}{C_0 [0,975 - (n - 1) 0,05] (l_{w_n} - l_{b_n})} \text{ или}$$

$$Z_n = \frac{50}{C_0 (1,025 - 0,05 n) (l_{w_n} - l_{b_n})} \text{ (11)}$$

Найдем теперь величину l_w — давление паров воды на поверхности раствора для последовательных периодов сушки, за которые испаряется по 50 грамм воды. Примем состав нормального сока свеклы таким:

Вх., — 20,0, Сах — 17,5, Дб. — 87,5, несакхара — 2,5, воды — 80,0%, соковой коэффициент 90%.

Выяснение значения l_w представляет значительные затруднения. Для определения давления водяных паров над жидкостью необходимо знать температуру жидкости. Работами сушильной лаборатории Теплотехнического Института выяснено (21), что „температура жидкости и материала при испарении его свободной влаги, помещенных в поток воздуха определенной температуры и влажности и лишенных потерь тепла в окружающую среду, при установившемся состоянии равна температуре мокрого термометра—психрометра, там же помещенного“. Когда же материал начинает испарять связанную влагу, температура его увеличивается с параллельным падением давления водяных паров на его поверхности.

В случае высушивания свеклы мы не имеем воды, которая могла бы трактоваться, как совершенно свободная. Как известно вода свеклы составляется из воды нормального сока и воды мякоти, или т.н. имбибиционной воды. Вода нормального сока составляет при выше указанном его составе, считая на вес свеклы, $(0,80 \times 0,90) \times 100 = 72\%$. Вода мякоти обычно составляет около 5% по весу свеклы. Общее количество воды в сахарной свекле, таким образом, составляет 77% по весу свеклы. Очевидно, с самого начала сушения вода свеклы находится в связанном состоянии и температура материала выше, чем температура мокрого термометра—психрометра, а давление паров ниже, чем давление паров над поверхностью воды. Будем вычислять давление паров воды над поверхностью сока по уравнению Рауля; $l_w = l_{w0} \frac{N}{N + n}$

где: l_w — давление паров воды над поверхностью раствора,

l_{w0} — давление паров чистой воды при температуре материала.

N — число молей растворителя.

n — число молей растворенного тела.

Согласно с предыдущим, температура материала будет ниже температуры воздуха и будет лежать между температурой влажного термометра психрометра, помещенного в этот воздух, и температурой самого воздуха. При чем, с течением процесса сушения температура материала приближается к температуре воздуха. В виду неисследованности этого вопроса для свеклы, мы будем брать l_{w0} при температуре воздуха, протекающего в сушиле. Это, конечно, вводит некоторую погрешность в вычисления.

Согласно с данным составом свеклы, 1 кг. ее в свежем виде содержит 770 грамм воды и 180 грамм сахара и растворенного несакхара; будем считать, что несакхар, содержащийся в растворе, имеет молекулярный вес, равный таковому же сахара, что мало изменит результаты вычислений.

Тогда количество молей растворителя на 1 кг. свеклы $770 : 18 = 43$, где: 18 — молекулярный вес воды. Количество молей растворенного вещества $\frac{180}{342} = 0,526$ молей (342 мол. вес сахарозы). Возьмем температуру воздуха, протекающего в сушиле, 85°C. Начальное давление водяных паров на поверхности раствора, согласно со сделанными допущениями, составит $l_w = \frac{43}{43 + 0,525} \times 433^*) = 428$ мм. ртутного столба.

*) где: — 433 — выражает давление паров чистой воды при — 85°.

В конце первого периода количество растворителя уменьшается на 5%, или 2.8 мол, Давление l_{w_2} в конце первого периода найдется из урав-

нения $l_{w_2} = \frac{40.2}{40.2 + 0.525} \times 433$; очевидно, среднее давление за первый период равно $\frac{l_{w_1} + l_{w_2}}{2}$. Таким же образом найдем давление для всех других периодов.

Итак, с известным приближением, мы нашли возможным определить значение переменных величин в уравнении (11). В нижеприведенной таблице II представлены результаты вычислений, сделанных для температуры 85°C. Везде численные значения вычислений округлены.

Таблица II.

% удаленной воды от начала сушки	Количество воды, удаленной в течение периода	Численный коэффициент U_p	Среднее давление паров воды на поверхности раствора l_w	Среднее давление паров воды раствора минус парциальное давление пара воздуха $(l_w - l_b)$	Произведение $3 \text{ на } 5 u \times (l_w - l_b)$	Продолжительность периода Zp
1	2	3	4	5	6	7
5	5	0.975	428	338	330	14,5
10	5	0.925	428	338	312	15,0
15	5	0.875	427.5	337.5	295	16,0
20	5	0.825	427	337	278	17,0
25	5	0.775	426	336	260	18,5
30	5	0.725	425	335	242	19,0
35	5	0.675	424	334	225	21,0
40	5	0.625	423	333	202	23,0
45	5	0.575	422	332	191	25,0
50	5	0.525	420	330	173	27,5
55	5	0.475	417	327	155.5	31,0
60	5	0.425	414	324	132	35,0
65	5	0.375	409	319	119.5	40,0
70	5	0.325	395	305	99.5	48,0
75	5	0.275	336	246	67.5	70,5

Среднее парциальное давление паров воды в воздухе принято равным 90 мм., что приблизительно соответствует воздуху при 85°, имеющему относительную влажность 20%.

Температура 85°C выбрана с тем, чтобы можно было сравнить результаты вычислений с результатами экспериментальной работы (13). Из последней взяты лишь два опыта высушивания при 85°C, так как в остальных, проводимых при низших температурах, условия опыта усложнены побочными обстоятельствами, зависящими от конструкции сушильного аппарата. Высушивание в указанной работе производилось в электрическом сушильном шкафу, на нижней полке последнего, куда притекал свежий нагретый воздух.

Цифры графы 7 таблицы II вычислены следующим образом: найдем выражение общей продолжительности высушивания $n \times 50$ гр. воды, где n — определяет число периодов, в течение каждого, из которых испаряется 50 гр. воды. Мы имели (см. уравнение 11).

$$Z_1 = \frac{50}{C_0 \times U_1 \times (lw_1 - lb_1)}$$

$$Z_2 = \frac{50}{C_0 \times U_2 \times (lw_2 - lb_2)}$$

$$Z_n = \frac{50}{C_0 \times U_n \times (lw_n - lb_n)}$$

откуда сумма первых n периодов времени сушки равна

$$\sum_1^n Z = \sum_1^n \frac{50}{C_0 \times U \times (lw - lb)} = \frac{50}{C_0} \sum_1^n \frac{1}{U (lw - lb)} \dots \dots \dots (12).$$

Мы имеем два опыта, проведенных при взятых выше условиях сушки. Оба опыта продолжались 420 минут, за это время было удалено в каждом опыте 75% воды по весу свеклы. Следовательно, для этого случая, отвечающего 15 периодам с испарением в каждом из них по 50 гр. воды, имеем

$$\sum_1^{15} Z = 420 \text{ минут.}$$

На основании уравнения (13) и графы 6 таблицы II имеем:

$$\sum_1^{15} Z = 420 = \frac{50}{C} \left(\frac{1}{330} + \frac{1}{312} + \frac{1}{295} + \dots + \frac{1}{67.5} \right).$$

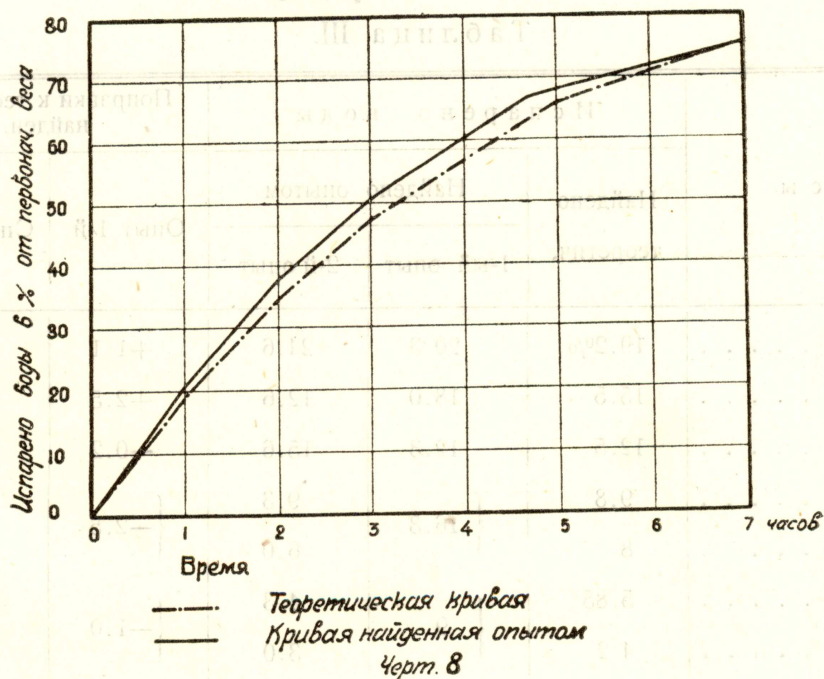
Отсюда нетрудно определить, что $C_0 = 0,0105$.

Подставляя значение C_0 в уравнении (10), мы найдем продолжительности каждого периода, данные в графе 7 таблицы II,

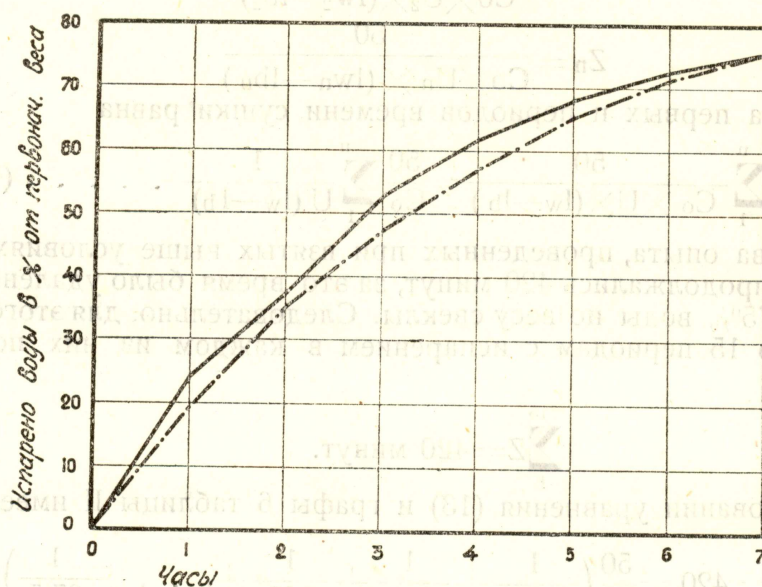
В таблице III сопоставлены данные теоретических вычислений и экспериментальной работы 13. То же самое представлено графически на диаграммах чертежей 8 и 9.

КРИВАЯ

скорости высушивания
при $t = 85^\circ\text{C}$. $\sum Z = 420 \text{ мин.}$



КРИВАЯ
 скорости высушивания
 при $t = 85^\circ\text{C}$. $\Sigma z = 420 \text{ мин.}$



— Теоретическая кривая
 — Кривая найденная опытом

Черт. 9

Из таблицы III и диаграмм видно, что, несмотря на некоторую неточность и большое количество допущений, теоретически полученные результаты довольно хорошо совпадают с практически полученными. Это позволяет предполагать, что принятый нами метод построения кривой скорости высушивания может при уточнении его дать вполне удовлетворительные по точности результаты.

Таблица III.

Ч а с ы	И с п а р е н о в о д ы			Поправки к теоретич. найден.	
	Найдено теоретич.	Найдено опытом		Опыт 1-й	Спыт 2-ой
		1-ый опыт	2-й опыт		
1-ый	19.20%	20.3	24.6	+1.1	+5.4
2-ой	15.5	18.0	12.6	+2.5	-2.9
3-ий	12.5	12.3	15.6	-0.2	+3.1
4-ый	9.8	{ 16.3	9.3	{ -2.5	-0.5
5-ый	8		6.0		-2
6-ой	5.85	{ 9	4.3	{ -1.0	-1.55
7-ой	4.2		3.0		-1.2

Как видно из чертежей 8 и 9, практически полученная кривая проходит несколько выше теоретической кривой. Это объясняется тем, что фактически за первые часы испаряется большее количество воды, чем дается теоретическими подсчетами. Малое количество опытов не позволяет установить определенно закона поправок. Однако можно сказать, что до испарения 50% воды по весу свеклы поправки почти всегда имеют положительное значение, после же испарения 50% воды всегда отрицательное. Времени, которому на теоретической кривой отвечает 50% испаренной воды, на кривой, полученной экспериментально, соответствует 53—55%. Неполнота фактического материала заставляет отложить окончательное решение вопроса, пока же для наших дальнейших построений примем следующее правило для нахождения кривой скорости высушивания.

1. Задаваясь условиями высушивания, пользуясь уравнениями (11) и (12), находим способом, указанным выше, теоретическую кривую высушивания.

2. Находим время Z_q , которому соответствует испарение 50% воды по весу свеклы.

3. Проводим новую кривую, имеющую то же начало и конец, что и теоретически найденная, но на которой времени Z_q отвечает не 50% воды, а $50 + 3 = 53\%$ воды.

Пользуясь построенной таким способом кривой, мы в дальнейшем попробуем увязать статический расчет сушила с динамикой сушильного процесса.

VI. Расчет сушилки.

Как мы видели выше время высушивания $\sum_1^n Z$, потребное для удаления n х 50 гр. воды из 1-го килограмма свеклы, определяется с достаточной для практики точностью в том случае, если известно Co из уравнения

$$\sum_1^n Z = \frac{50}{Co} \sum_1^n \frac{1}{(l_w - l_b) u} \dots \dots (12),$$

где все величины при заданных условиях высушивания известны.

В этом уравнении Co представляет произведение $(1 + \alpha t) \times \sqrt{v} \times f \times So$. Если So величина известная, то то же u -ие может быть написано так:

$$\sum_1^n Z = \frac{50}{C} \sum_1^n \frac{1}{(l_w - l_b) O} \dots \dots (13),$$

где O —по предыдущему равно: $So \times U$ и $C = (1 + \alpha t) \times \sqrt{v} \times f \dots (4)$

В уравнении (4) неопределенным является коэффициент f . Если бы экспериментальные определения коэффициента f показали, что он представляет постоянную величину, то, находя из уравнения (4) величину C , задаваясь значениями V и t и подставляя C в уравнении (11) и (13), можно было бы легко найти общую продолжительность высушивания и характер процесса сушения. Однако в нашем распоряжении не имеется материала для суждения о величине f . В виду этого мы воспользуемся данными о длительности сушения свеклы в сушилке Лорео. На заводе в Лорео продолжительность высушивания

3 ч. 40 минут. В первые 100 минут удаляется 75% воды, а в следующие 120 минут только 2,5%. Скорость воздуха в первые 100 минут, судя по описаниям сушилки, около 0,25—0,5 метр/сек. Поэтому в дальнейшем мы примем для нашего расчета время испарения 75% воды

по весу сырой свеклы, или иначе $\sum_{i=1}^{15} z = 100$ минутам. Вопрос о процессе высушивания, при котором сушеная свекла может храниться без опасности порчи, требует специального изучения. Как мы видим, высушивание последних 2,5% воды требует 2 часов, тогда как высушивание первых 75% требует всего 1 ч. 40 минут. Естественно, что, поднимая предел высушивания на величину 2,5%, мы значительно упростим конструкцию сушил. Поэтому по поводу Scott Carret и Riley (12) пишут: „Весьма вероятно, что сушеная стружка будет устойчиво сохраняться и при наличии в ней влаги выше 10—12%*) при условии, что содержащиеся в ней белки будут обращены в „роговидное состояние“, т. е., если они утратят свою гигроскопическую способность и если материал будет достаточно стерелизован.

Однако сомнительно, чтобы процесс ороговения происходил в последней стадии высушивания, которая протекала в Лорео при температуре 90°C, тогда как опыты Kroeker'a [(16) стр. 29] установили, что мякоть свеклы теряет способность имбибиции при высушивании лишь при 110°C. Во всяком случае, пока вопрос о рациональном пределе сушения не решен экспериментально, следует остановиться на пределе, принятом в Лорео. Поэтому в дальнейшем расчете мы будем принимать, что свекла, после удаления из нее 75% воды, досушивается в специальной „камере досушивания“.

Перейдем к нахождению кривой высушивания при $\sum_{i=1}^{15} z = 100$ минут. Выберем среднюю температуру сушимого материала, равной 100°C.**) Согласно с предыдущим, эта же температура будет средней температурой воздуха в каждой камере. (см. стр. 15).

Примем, что сушилка работает при соблюдении принципа противотока. Воздух последовательно проходит камеру досушивания и все сушильные камеры, перемещаясь в направлении, противоположном движению сушимой стружки. При этом парциальное давление паров воды в нем увеличивается за счет испаряющейся влаги. Для того, чтобы учесть возрастание парциального давления паров воды, необходимо знать количество воздуха, вводимого в сушило. Как не трудно видеть на J—d диаграмме, парциальное давление при данном барометрическом давлении зависит от влагосодержания. При данном же влагосодержании, выраженном в граммах на килограмм сухого воздуха, независимо от температуры, парциальное давление будет одинаково. Таким образом, задавая определенным весом воздуха, приходящимся на один кг. испаряемой влаги, и учитывая приращение его влагосодержания, мы можем найти парциальное давление водяных паров в нем в любой момент. (1)

Выше мы указывали на процесс сушения с температурой 450°C, как на предел, до которого повышение температуры сушения представляет значительные экономические выгоды. Поэтому мы зададимся целью получить процесс, равноэкономичный ему и протекающий в гра-

*) 10—12% по весу сухого вещества тот предел, до которого высушивается свекла по способу де-Векки.

**) Предполагается, что, благодаря циркуляции, в камере поддерживается температура, равная средней между температурами входящего и выходящего воздуха.

ницах температур, допускаемых свеклой. Соответственный расход воздуха будет равен 6,8 кг. на 1 кг. испаренной влаги. Парциальное давление водяного пара в воздухе может быть найдено из уравнения

$$l_b = b \frac{d}{653 + d} \quad (14),$$

где: l_b — парциальное давление,
 b — барометрическое давление,
 d — влагосодержание в граммах на 1 кг. сухого воздуха (см. I стр. 10).

Разобьем так же, как мы это делали в предыдущей главе, процесс высушивания на ряд периодов, в течение которых испаряется по 50 грам воды на 1 кг. сухой свеклы, и подсчитаем для каждого периода среднее значение переменных. Метод подсчета переменных: поверхности свекловичной стружки—0 и давления паров воды на поверхности раствора l_w был дан выше. Здесь же покажем, как находится значение l_b .

Начальное содержание влаги поступающего в камеру досушивания воздуха примем равным 3,0 грамма, что соответствует приблизительно 80% относит. влаж. и температуре 0,0°C. Допустим, что в камере досушивания испаряется 20 грамм воды на 1 кг. свеклы, т. е. 2%. Расход воздуха составляет при принятых условиях на 1 кг. испаряемой воды—6,8 кг., а на 1 кг. свеклы:

$$\frac{77}{100} \times 6,8 = 5,25 \text{ кг.},$$

где $77 = 75 + 2$ есть процент испаренной воды из свеклы.

Воздух, поступающий в сушило, имеет влажность $3 + \frac{20}{5,25} = 3 + 3,7 = 6,7$ грамма на 1 кг. сухого воздуха. Парциальное давление водяных паров в нем найдем по уравнению (14) $l_b = b \frac{6,7}{623 + 6,7}$. При $b = 745 \text{ мм.}$ $l_b = 745 \times \frac{6,7}{629,7} = 7,8 \text{ мм.}$

После испарения 50 грамм воды в первый период сушки содержание воды на 1 кг. сухого воздуха составляет $6,7 + \frac{50}{5,25} = 6,7 + 9,55 = 16,25 \text{ гр.}$ и давление водяных паров по уравнению (14)

$$l_b = 745 \times \frac{16,25}{639,25} = 18,9 \text{ мм.}$$

Среднее давление за первый период сушки

$$\frac{18,9 + 7,8}{2} = \frac{26,7}{2} = 13,35 \text{ мм.} \approx 13 \text{ мм.}$$

Аналогично найдем влагосодержание и парциальное давление для любого периода.

В таблице IV даны результаты этих вычислений, при чем принято, что стружка изрезывается ножами системы Чижека и толщина ее равна 1,5 мм.

Таблица IV.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
°/о испаренной воды от начала высушивания	°/о испаренной воды в течение периода	Значение коэффициента α	Произведение $s_o \times \alpha = 0$	Среднее давление на поверхности раствора l_w	Среднее парциальное давление паров воды l_b	Разность $(l_w - l_b)$	Произведение $0 \times (l_w - l_b)$ (округлено)	Влагосодерж. d в конце периода	Длительность периода z_n
50/о	50/о	0,975	1,56	750	145,0	605,0	950	150,05	3,90
10	5	0,925	1,48	750	137,0	613,0	910	140,4	4,10
15	5	0,875	1,40	750	129,0	621,0	870	130,85	4,30
20	5	0,825	1,32	749	121,0	628,0	830	121,3	4,50
25	5	0,775	1,24	748	113,0	635,0	790	111,75	4,70
30	5	0,725	1,16	746	105,0	641,0	745	102,2	5,00
35	5	0,675	1,08	744	96,5	647,5	700	92,65	5,35
40	5	0,625	1,00	742	87,5	654,5	655	83,10	5,70
45	5	0,575	0,92	739	78,5	660,5	610	73,55	6,10
50	5	0,525	0,84	736	69,4	666,6	560	64,0	6,65
55	5	0,475	0,76	732	60,0	672,0	510	54,45	7,31
60	5	0,425	0,68	725	50,2	674,8	460	44,9	8,10
65	5	0,375	0,60	718	39,7	670,3	410	35,35	9,10
70	5	0,335	0,52	692	29,6	662,4	345	25,8	10,8
75	5	0,275	0,44	590	13,00	577,0	255,0	16,25	14,6

Коэффициент C находится из уравнения (13)

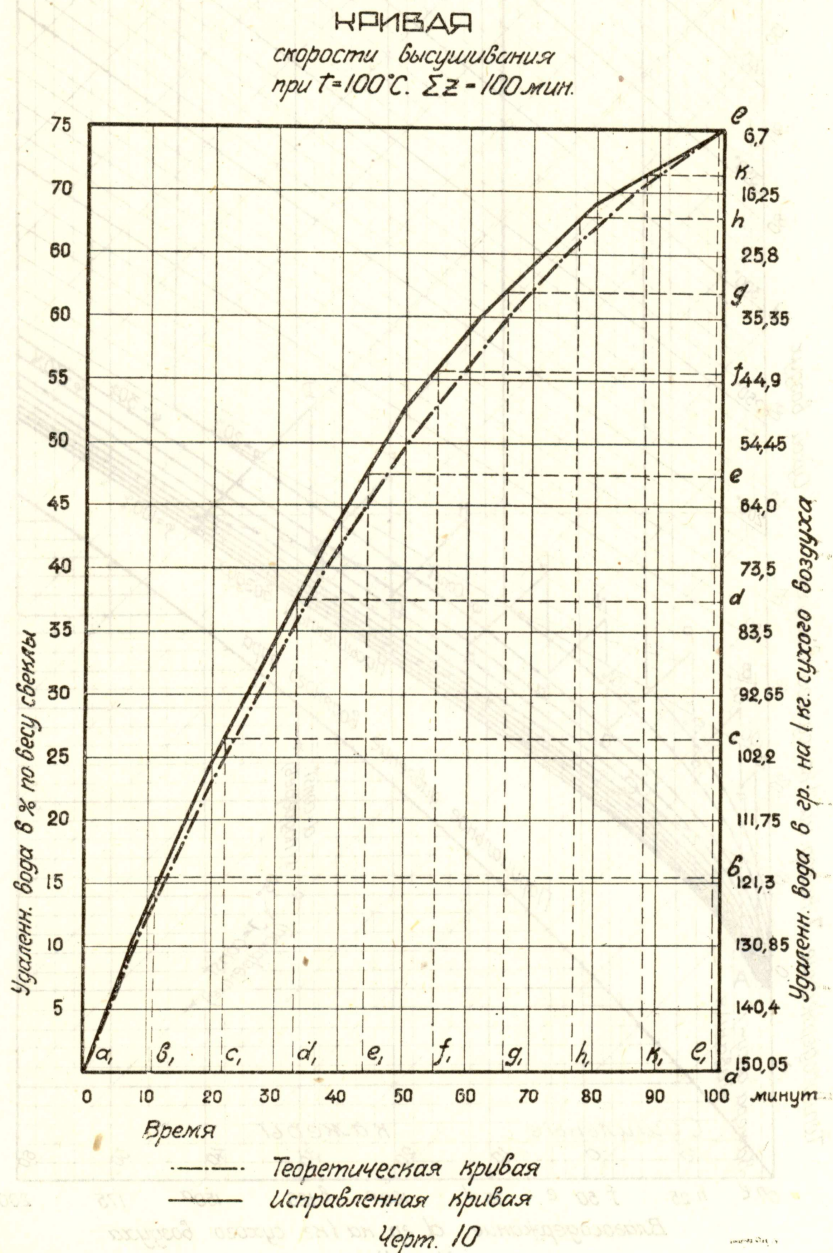
$$\sum_1^{15} Z = 100 \text{ мин.}; \quad \sum_1^{15} Z = \frac{15}{C} \sum_1^{15} \frac{1}{O \times (l_w - l_b)};$$

отсюда $C = 0,0134$. Подставляя C в уравнении (8)

$$Z_n = \frac{50}{C \times (l_{wn} - l_{bn}) \times O_n}, \text{ находим значения } Z_n. \text{ данные в графе 10.}$$

На основании данных таблицы построена кривая (чертеж 10) скорости высушивания для $\sum_1^{15} Z = 100$ и $t = 100^\circ \text{C}$. На том же чертеже дана исправленная, согласно с указаниями данными на стр. 19, кривая скорости высушивания. Как видно из таблицы IV, та же кривая дает зависимость между продолжительностью высушивания и нарастанием абсолютной влажности воздуха, работающего в сушиле (табл IV графы 9 и 10). На диаграмме черт. 10 поэтому на второй вертикальной оси отложено содержание влаги в воздухе на 1 кг. сухого воздуха. Пользуясь этой кривой, можно легко нанести на $J-d$ диаграмму процесс сушения с промежуточными подогревами работающего воздуха. Осу-

построим это построение для корридорного сушила. Для этой цели прежде всего установим продолжительность пребывания вагонетки в камерах. Время пребывания вагонетки в каждой камере определяется последней камерой, из которой отработавший воздух удаляется из сушила и в которую поступает свежая стружка. Температура удаленного воздуха принята нами в 70°C . Согласно условию, средняя температура воздуха должна быть равна 100°C . Следовательно, высота нагрева воздуха перед впуском его в последнюю камеру 130°C . Процесс сушения в последней камере изобразится на $J-d$ диаграмме (см. черт. 11) линией CD . Количество воды, поглощенное воздухом в этой камере на один кг. сухого воздуха, найдем, опустив перпендикуляры из точек C и D на горизонтальную ось. Это количество, представленное на чертеже отрезком ba , равно 29 грамм. Находим на диаграмме скорости высушивания (черт. 10), что для поглощения воздухом

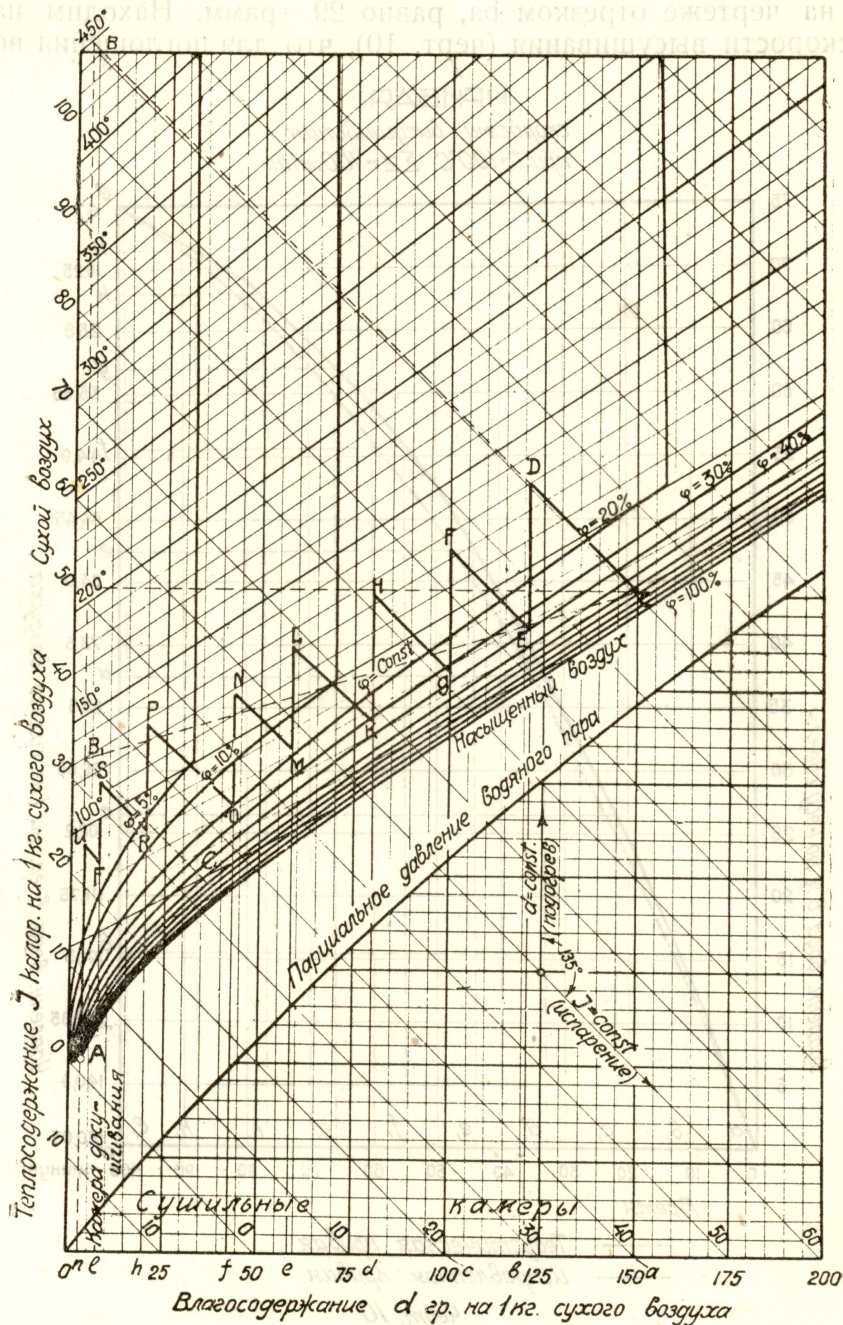


29 грамм понадобится 11 минут. Значит, время пребывания вагонетки в первой камере должно быть равно 11 минутам. В других камерах, очевидно, вагонетка может быть либо 11 минут, либо время, кратное 11 минутам. Отсюда число вагонеток равно $100:11 \approx 9$.

Разобьем на диаграмме скорости высушивания (черт. 10) время на промежутки, в 11 минут каждый (отрезки a_1b_1 ; b_1c_1 ; c_1d_1 ; d_1e_1 ; e_1f_1 ; f_1g_1 ; g_1h_1 ; h_1k_1 ; k_1l_1). Количество воды, поглощенное 1 кг. сухого воздуха в течение каждого промежутка, легко находится из диаграммы

I-d диаграмма

проф. И. Рамзина



Черт. 11

(черт. 10). Что дают отрезки ab , bc , cd , de , ef , fg , gh , hk , kl . Задаваясь временем пребывания вагонетки в различных камерах, можно найти количество воды, испаренной в них. Возьмем, например, время пребывания вагонетки в первых 5 камерах по 11 минут. В них, следовательно, разместится 5 вагонеток. Остальные 4 поместим в двух камерах, по две в каждой.

Следовательно, время пребывания вагонетки в камерах 6 и 7 будет равно 22 минутам.

Таблица V.

Камеры	Время пребывания вагонетки	Количество испарен. воды.	Отрезок на диаграмме чер. 10 и 11
1	11	29,5	a b
2	11	21,1	b c
3	11	21,0	c d
4	11	19,2	d e
5	11	16	e f
6	22	23,5	f h
7	22	12,5	h I

Количество испаренной в каждой камере воды на 1 кг. сухого воздуха, найденное по диаграмме скорости высушивания, дано в таблице V.

Вернемся теперь к J—d диаграмме. На горизонтальной оси J—d диаграммы (черт. 11) в известном масштабе отложены содержания влаги в граммах на один кг. сухого воздуха. Отложим на этой оси последовательно отрезки, изображающие количество воды, поступающей в сушило в грамм. на 1 кг. сухого воздуха—(on), количество воды, поглощаемые воздухом в „камере досушивания“—(nl), и количества воды, поглощаемое воздухом в последовательных камерах (hl, fh, ef, de, cd, bc, ab). Проведя через эти точки линии, перпендикулярные горизонтальной оси и, следовательно, удовлетворяющие уравнению $d = \text{const}$, мы получим линии подогрева воздуха в калориферах между соседними камерами. На этих линиях будут лежать начальные и конечные точки процессов, идущих в отдельных камерах. Это построение, очевидно, предполагает, что процесс сушения протекает в каждой камере совершенно одинаково как в момент входа, так и в момент выхода из нее вагонетки. Откладываемое нами количество влаги, поглощенное в отдельной камере, представляет некоторое среднее для данной камеры значение. Очевидно, что в действительности „процесс сушения“, за время пребывания свеклы в отдельной камере, изменяется тем значительнее, чем больше длительность пребывания в ней свеклы. Поэтому наше построение не вполне точно. Однако, благодаря короткому времени, в которое вагонетка с стружкой находится в отдельной камере, скорость сушения за это время меняется незначительно и, ведя расчет на среднюю величину влагопоглощения, мы не делаем большой ошибки.

Итак, мы получили линии подогрева воздуха в промежуточных калориферах. Имея линии подогрева воздуха в промежуточных калориферах, нетрудно построить линии, изображающие работу воздуха в отдельных камерах. Имеются следующие условия для их построения.

1. Начальные и конечные точки этих линий лежат на линиях подогрева.

2. Для теоретич. сушилки эти линии направлены параллельно линии $J = \text{const}$.

3. Средняя температура изображаемого процесса равна по заданию 100°C .

Подберем для каждой камеры линию, удовлетворяющую этим условиям. Таким образом, мы получаем на $J-d$ диаграмме ломанную линию CDEFGHKL MNOPRSFUA, дающую изображение сушильного процесса. Эта линия относится к сушилке без потерь, т. е., где $\Delta = 0$. Определив потери, не трудно нанести на диаграмму процесс, идущий в реальной сушилке, согласно с правилами, изложенными в главе II.

Итак, пользуясь $J-d$ диаграммой и кривой скорости высушивания, мы получили изображение сушильного процесса для корридорного сушила, разделенного на ряд изолированных камер. Расчет сушила, разделенного на камеры с перемещением в них материалов ленточными транспортерами (ленточные сушила см. черт. 4), может быть несколько видоизменен, так как ленточные сушила не связаны условием кратности времянахождения свеклы в отдельных камерах. Будем поступать следующим образом. Нанесем сначала на $J-d$ диаграмму процесс сушения такой, какой нам желателен, с теми лишь условиями, чтобы, как и в выше разобранном случае, для корридорного сушила $t_{\text{max}} \leq 130^\circ$, $t_{\text{сред.}} = 100^\circ \text{C}$. Найдем на $J-d$ диаграмме количество воды, испаренной в каждой камере на 1 кг. сухого воздуха. Отложив эти отрезки на диаграмме скорости высушивания, мы найдем времянахождения свекловичной стружки в каждой камере. Скорость отдельных транспортеров должна быть такая, чтобы стружка за найденное для данной камеры время переместилась на величину длины камеры. Способ построения весьма прост и потому особым чертежом не поясняется.

Настоящая работа представляет одну из первых попыток увязать динамику сушильного процесса с статическим расчетом. Совершенно ясно, что в качестве первого приближения к решению вопроса, приведенный расчет содержит большое количество условностей, что в данном случае неизбежно. Самое построение кривой скорости высушивания, за отсутствием соответствующего экспериментального материала, может быть пока выполнено с известным количеством допущений. Однако и в настоящем виде предлагаемая работа может до известной степени способствовать выяснению процесса сушения сахарной свеклы и проектированию сушил для свекловичной стружки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Проф. Л. К. Рамзин. Расчет сушилок и J—d диаграмма. Известия теплотехнического и-та, № 1, 1927 г.
 2. Проф. В. Е. Грум-Гржимайло. Теория и конструкция сушил. Известия Горного ин-та, № 7, Екатеринбург, 1920 г.
 3. Проф. В. Е. Грум-Гржимайло. Пламенные печи, том. I.
 4. Н. И. Полевицкий. Руководство по заготовке сушеных овощей для продовольствия войск. 1915 г.
 5. Н. И. Полевицкий. Промышленная сушка картофеля в овощных и крахмальных сушилах. 1915 г.
 6. Инженер Пиэттэ. Проблема работы сахзавода на сушеной свекле (рукопись).
 7. Дебу. Сушка картофеля
 8. Пиэттэ и Соколов. Проблема работы сахзаводов на сушеной свекле. Научные записки Государственного экспериментального Института сахарной промышленности. Выпуск 4, 1925 год.
 9. Ройтман и Маковецкий. Сушка воздухом и дымовыми газами. 1925 г.
 10. Инж. Бенин. К вопросу о консервировании свеклы путем ее высушивания. Научные записки Государств. эксперим. Ин-та Сах. Промышл. за 1927 г., выпуск VII и 2.
 11. М. Сушение и переработка свеклы по способу де-Векки. Сборник статей по сахарной промышленности. Выпуск № 10, 1927 год.
 12. Сушение и переработка сахсвеклы по способу де-Векки. Журнал сахарной промышленности, № 1, 1928 год.
 13. Проф. С. В. Лебедев и Н. Г. Забегалов. К вопросу о динамике высушивания сахарной свеклы.
 14. Хим. Палкин и инж. Караваяев. Исследование сушеной сахарной свеклы на инверсию и на сахаристость получаемых диффузионных соков.
 15. Гарденин и Егоров. Новый тип свеклосахарных заводов. Москва, 1923 год.
 16. О. Вогрызек. Химия сахарной промышленности.
 17. М. Н. Сыромятников. К вопросу о сушке свеклы. Бюллетень Сахаротреста. 1928 г., март № 3/59.
 18. Инж. Лурье. Современные типы сушилок. Труды 2-го Теплотехнического съезда, 1924 года.
 19. № 52 Известия новейшей сельскохозяйственной техники за 1927 г.
 20. Проф. Якушкин. Бюллетень Сахаротреста. 1928 г., № 5.
 21. Инж. Лурье. Расчет сушилки для типографской краски. Известия теплотехнич. ин-та 1927 г., № 10.
 22. Проф. Дешевой. Расчет сушильного устройства для дерева.
-