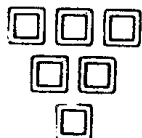


Проф. ЛЕБЕДЕВ С. В. и Инж. СТАБНИКОВ В. Н.

# ДИНАМИКА СУШЕНИЯ ≡≡≡ ≡≡≡ САХАРНОЙ СВЕКЛОВИЦЫ



---

Томск — 1929 г.

## Динамика сушения сахарной свекловицы.

В статье—„К вопросу о выборе типа сушила для свекловичной стружки и основные положения расчета“ (1) авторами настоящей работы была отмечена возможность нанесения на J—d диаграмму проф. Рамзина процесса сушения свеклы, идущего в многокамерной сушилке с промежуточным подогревом воздуха. Необходимым условием является, однако, предварительное изображение процесса сушения сахарной свеклы в координатах: время—количество удаленной воды. Эту вспомогательную кривую мы назвали кривой скорости высушивания. Не имея экспериментальной материала, в упомянутой работе мы были принуждены отказаться от дифференцировки процесса высушивания в различных стадиях сушения и принять температурные условия сушения единообразными для всех камер сушилки. Однако, в этом лежит весьма существенная неувязка с самым характером и задачей промежуточного подогрева воздуха в сушилке, позволяющего дифференцировать процесс высушивания, создавая для каждой стадии специфические условия. Для дифференциации процесса сушения при расчете сушила, как было указано в упомянутой статье, необходимо нахождение некоторых опытных коэффициентов, не определявшихся до сих пор. Задача, преследуемая нами, в данном случае сводится к следующему: найти способ построения кривой скорости высушивания при любых условиях. Можно было бы ограничиться получением таких кривых экспериментальным путем для различных условий, но задача в этом случае представлялась бы совершенно невыполнимой в необходимой мере, так как комбинаций различных факторов, влияющих на скорость сушения, может быть очень много. Несомненно такой путь может применяться для решения отдельной частной задачи, но в общем решение должно быть основано на приложении к исследуемому процессу какого-либо уравнения для скорости высушивания и к нахождению опытных коэффициентов, в него входящих. Размеры колебания величин этих коэффициентов укажут вместе с тем на применимость взятого уравнения.

### 1. Уравнения скорости высушивания.

Явление высушивания с теоретической стороны представляет мало исследованную область. Некоторые авторы (Пстр. 59) прямо отмечают невозможность теоретического учета явления в виду сложного его характера. Однако, все же существуют уравнения, связывающие скорости испарения с условиями высушивания и качеством сушеного материала. Из таких уравнений отметим два. Первое из них приводится проф. Дешевым (III. стр. 10). Это уравнение выводится из чисто физических соображений о количестве тепла, передаваемого через определенную площадь при определенных условиях. Оно имеет вид:

$$h = \frac{S \times p \times d}{100 \times K \times T \times 0} \dots \dots \dots (1)$$

здесь:  $h$  — время сушки в часах,  
 $S$  — количество теплоты, необходимое для нагревания воды и  
 обращения ее в пар известной температуры,  
 $d$  — % влажности высушиваемого материала,  
 $p$  — вес высушиваемого материала,  
 $k$  — коэффициент теплопередачи от воздуха к внутренним  
 слоям материала,  
 $O$  — поверхность материала,

В этом уравнении неизвестным эмпирическим коэффициентом является коэффициент теплопередачи  $K$ , выражаемый уравнением:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha} + \frac{0.5\delta}{\lambda} + \frac{0.5\delta}{\beta} \dots \dots \dots (2)$$

где  $\alpha = 2 + 10 \sqrt{v}$ ; в этом выражении  $v$  — скорость протекающего воздуха в мт. в сек.  $\delta$  — толщина сушеного материала в мм.,  $\lambda$  и  $\beta$  численные коэффициенты, находимые эмпирически. Очевидно, что, пользуясь уравнением (1), мы можем найти только коэффициент  $K$ . Коэффициент же  $K$ , как видно из уравнения (2), представляет функцию от скорости движения воздуха  $v$ , толщины пластинки  $\delta$  и коэффициентов  $\lambda$  и  $\beta$ . Поэтому задача в данном случае сводится к нахождению этих коэффициентов  $\lambda$  и  $\beta$ , что представляет довольно большие затруднения. Более простую задачу составляет нахождение коэффициента, входящего во второе известное нам уравнение для скорости высушивания. Это уравнение (II стр. 78) м. б. представлено так:

$$\Delta w = f \times (1 + \alpha t_1) \times O \times \Delta P \times \sqrt{v} \times \Delta z \dots \dots \dots (3)$$

здесь:  $\Delta w$  — количество воды в граммах, испаренное за время  $\Delta z$  мин., отнесенное к единице веса.

$f$  — искомый коэффициент.

$(1 + \alpha t_1)$  — бином расширения газа.

$O$  — поверхность материала на единицу веса.

$\Delta P$  — разность давления паров воды на поверхности сушеного материала и парциального давления паров воды, воздуха в мм. ртутного столба.

$v$  — скорость движения воздуха (в мт. в мн.).

Значение коэффициента  $f$  может быть выяснено следующим образом.

Примем, что:

1. Бином расширения  $(1 + \alpha t_1) = 1$  т. е.  $t_1 = 0$ .
2. Площадь  $O = 1$  кв. мт. на 1 кг. материала.
3.  $\Delta P = 1$  мм.
4.  $\sqrt{v} = 1$  мт. в мн. т. е.  $v = 1$  мт. в мн.
5.  $\Delta z = 1$  мн.

тогда  $f = w$

т. е.  $f$  равно количеству воды в граммах, испаряемому в одну минуту из одного килогр. сушеного материала при температуре  $0^\circ \text{C}$ , разно-

сти давления  $\Delta P = 1$  мм, площади одного кило  $0 = 1$  кв. мт., скорости воздуха 1 мт. в мн. Таким образом, можно предположить, что коэффициент  $f$ , получаемый из уравнения (3), имеет определенное значение и, в случае применимости выражения (3) к процессу высушивания, должен быть численно устойчивым.

Для вычисления коэффициента  $f$  необходимо знать, чему равны  $0, \Delta P, t_1$  и  $v$ . Из этих величин в процессе сушения меняют свою величину  $0$  и  $\Delta P$ . Поэтому первоначально необходимо обратиться к изучению изменения поверхности и давления в процессе сушения.

## II. Изменение площади поверхности свекловичной стружки в процессе сушения.

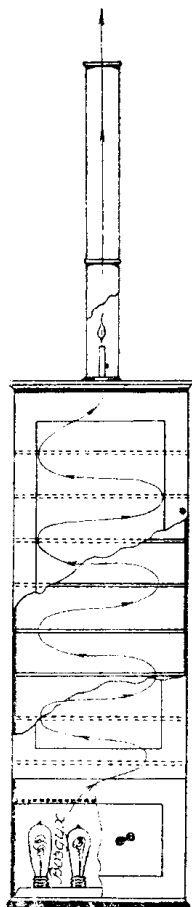
В процессе высушивания площадь поверхности сахарной свекловицы значительно уменьшается вследствие уменьшения в ней количества воды. Характер зависимости между количеством удаленной воды и уменьшением площади поверхности неизвестен. Целью приводимых ниже опытов было выявление связи между количеством удаленной воды и уменьшением площади поверхности высушиваемой свекловичной стружки. Для сравнимости результатов при подсчетах изменение веса, или иначе количество удаленной воды бралось в процентах от первоначального веса свеклы. Изменение поверхности выражалось в % от первоначальной площади поверхности свеклы.

Выбор первой величины был до некоторой степени произвольным. Казалось бы, что с большим основанием можно взять процент уменьшения веса не от первоначального веса свеклы, а от содержания воды в исходном продукте. Однако, как будет показано в дальнейшем, и между взятыми нами величинами имеется весьма тесная связь, вполне удовлетворяющая нашим целям. Таким образом, задача сводилась к нахождению характера зависимости между количеством удаленной воды в процентах первоначального веса, наносимым на координату  $X$ , и уменьшением площади поверхности свекловичной резки в процентах от первоначальной площади поверхности, наносимым на координату  $Y$ .

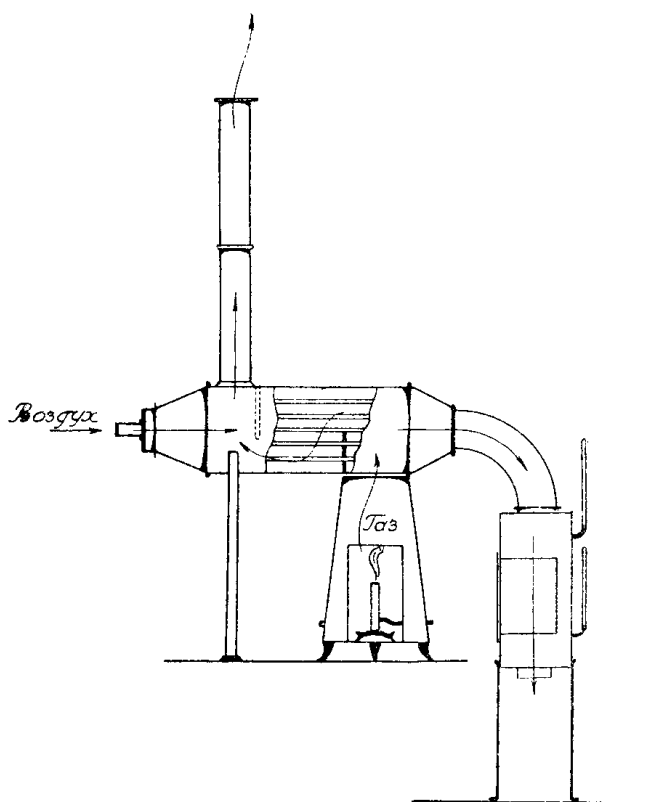
При изучении характера изменения естественно было бы взять для исследования свеклу в той же форме, в которой она берется для практических целей. Однако, изучение изменения поверхности свеклы в форме нормальной стружки представляет чрезвычайно трудную задачу, так как сечение ее имеет сложную фигуру, изменяющуюся к тому же в процессе сушения. Поэтому для изучения изменения поверхности лучше брать не стружку в целом, а составляющие ее элементы, т. е. пластинки, ограниченные взаимно параллельными плоскостями. По существу, свекловичная стружка обычно состоит из двух пластинок, соединенных под углом. Таким образом, не будет ошибкой распространить закономерности, найденные для изменения площади пластинок, на стружку, представляющую соединенные двух таких пластинок. В связи с этим в дальнейшем исследовались пластинки свекловицы.

Высушивание свеклы производилось в одном из двух сушильных шкафов в зависимости от требуемой скорости протекающего воздуха. Один из них с электрическим нагреванием и с подачей воздуха снизу,

и вытяжкой отработавшего воздуха сверху при помощи трубы (черт. 1), второй (чер. 2) — с нагревом воздуха в калорифере и с подачей его вентилятором в верхнюю часть сушильной камеры. Для отвода воздуха служит круглое отверстие в нижнем дне камеры с диаметром, равным диаметру анемометра, вставлявшегося для определения скорости воздуха в выходное отверстие. Температура воздуха регистрировалась двумя термометрами, расположенными на расстоянии 13,5 см. друг от друга по высоте камеры. Испытуемые пластинки высушиваемой свеклы в том и другом шкафу подвешивались на проволоке в сушильном пространстве, не соприкасаясь друг с другом. Такое расположение гарантировало участие в отдаче влаги всей поверхности пластинки. Взвешивание пластинок производилось с точностью до 0,01 грамма. Площадь определя-



Черт 1.



Черт. 2. Сушильный аппарат с продуванием воздуха.

лась следующим образом: испытуемая пластинка помещалась на лист миллиметровой бумаги и обводилась тонко заточенным карандашом. Подсчетом квадратиков внутри контура находилась площадь пластинки. Принималось, что площадь поверхности всей пластинки изменяется пропорционально одной из ее плоскостей, что, как видно из дальнейшего, близко к истине. Производя ряд взвешиваний и определений площади в процессе сушения, (для чего пластинки вынимались из сушила), и нанося результаты подсчетов в виде графика, мы получили линию, дающую связь между изменением поверхности и количеством удаленной воды.

Можно было предполагать, что на характер изменения площади могут оказывать влияние следующие факторы:

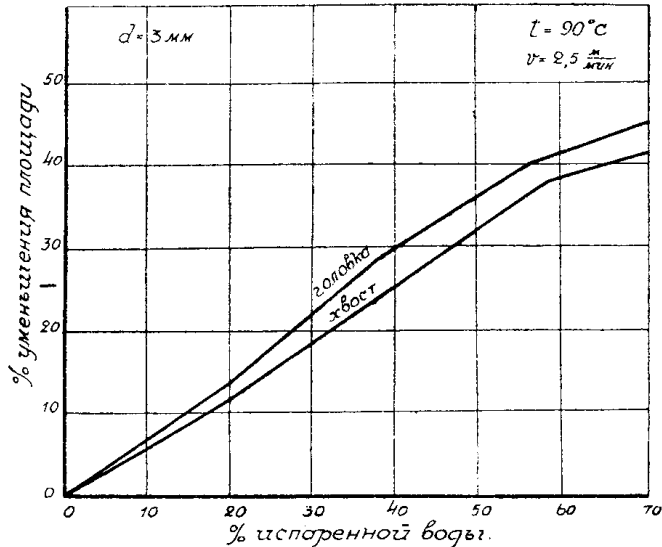
1. Место выреза испытуемой пластинки (головка, хвост...) из корня свеклы,

2. Направление среза (поперечный, продольный, косой).
3. Толщина пластинки,
4. Темп высушивания.

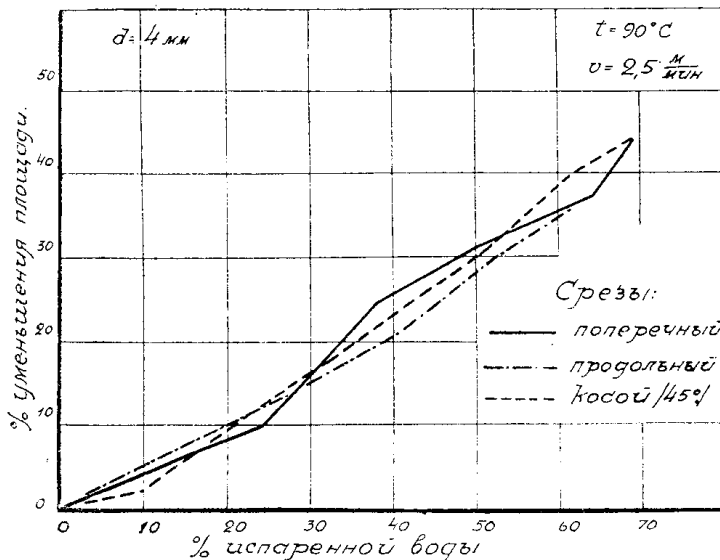
Описываемые ниже опыты имели своей целью дать ответ на вопрос о характере влияния отмеченных факторов на изменение поверхности высушиваемой свекловичной пластинки. Рассмотрим значение каждого фактора в отдельности,

**Фактор 1.—Место среза.** На черт. 3 даны кривые высушивания в одинаковых условиях ( $t = 90^\circ \text{C}$ ,  $v = 2,5 \text{ м. в мн.}$ ) пластинок одинаковой толщины, вырезанных в продольном направлении из одного корня. При чем одна пластинка вырезана из верхней части свеклы, другая из хвоста. Кривые показывают, что если различие между характером процесса уменьшения площади этих двух срезов и есть, то весьма незначительное, а именно: уменьшение площади более интенсивно проходит для пластинки, вырезанной из верхней части, где сосудистоволокнистые пучки идут почти параллельно оси свеклы.

Учитывая это обстоятельство, в дальнейших опытах брались пластинки, вырезанные только из верхней части, так как именно эта часть представляет основную массу свеклы и имеет потому наибольший для практики интерес.



Черт. 3. Зависимость изменения площади от места среза.



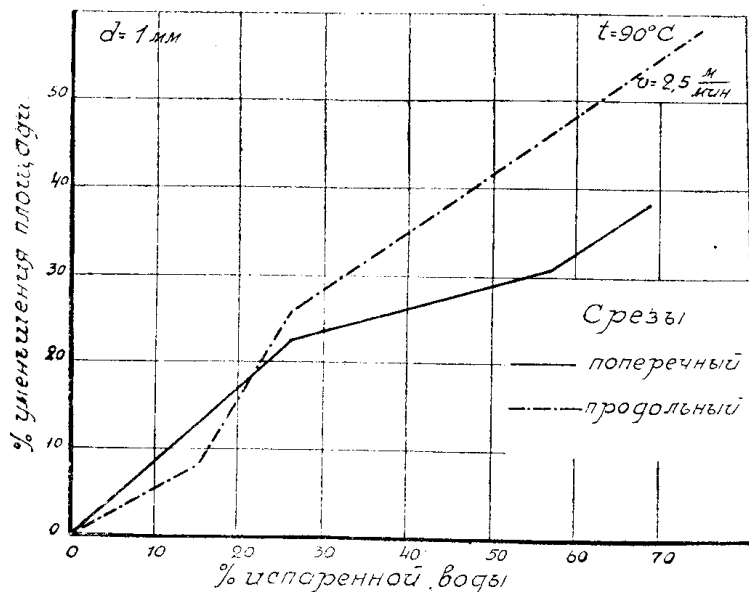
Черт. 4. Зависимость изменения площади от направления среза.

Взято три направления: поперечное, продольное (тангенциальное) и косое под углом в  $45^\circ$  к оси корня. Как видно из чертежей, наблюдается более интенсивное изменение поверхности для продоль-

При незначительном расхождении результатов изменений для головной и хвостовой части выводы, верные для первой, могут быть без большой ошибки распространены и на вторую.

**Фактор 2.—Направление среза.** Кривые на черт. 4, 5, 6 и 7 дают изображение изменения площади поверхности пластинок, различающихся только направлением среза, при одинаковых прочих условиях высу-

ных направлений среза. Особенно резко это выявлено для пластинок малой толщины (около 1 мм.). Для пластинок толщиной 3—4 мм. значительной разницы не наблюдается и, если таковая и заметна, то



Черт. 5. Зависимость изменения площади от направления среза.

только в последних периодах высушивания. Поэтому можно заключить: характер изменения поверхности высушиваемой свекловичной пластинки при толщине ее 3—4 мм. мало зависит от направления среза.

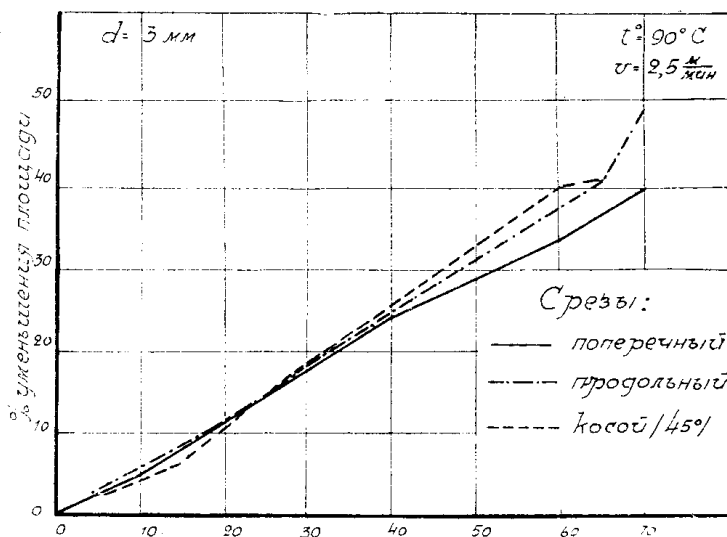
Основываясь на вышеуказанном, мы возьмем в дальнейшем, как объект исследования, одно определенное направление, имеющее наибольшее значение в практике. Именно — продольное. Однако не будет ошибкой в

распространении выводов, сделанных для продольных срезов, на все прочие направления срезов.

Факторы 3 и 4.—Толщина пластинки и темп высушивания. Для выявления влияния этих факторов были поставле-

ны опыты с продольными срезами из верхней части свекловицы. Как отмечено выше, именно эти срезы наиболее интересны для практических целей, вместе с тем выводы, сделанные для них, могут быть без большой ошибки распространены и на все иначе вырезанные пластинки.

Было проведено две серии опытов А и В при следующих условиях:



Черт. 6. Зависимость изменения площади от направления среза.

- Серия А. —  $t = 90^{\circ} \text{C}$ ,  $v = 2 \text{ м. в. мн.}$   
высушивание производилось в шкафу с электрическим нагреванием.

Серия А включала 3 группы опытов:

- $A_{2-2,5}$  с толщиной пластинок от 2-х до 2,5 мм.
- $A_{3-3,5}$  " " " " 3-х " 3,5 "
- $A_{4-4,5}$  " " " " 4-х " 4,5 "

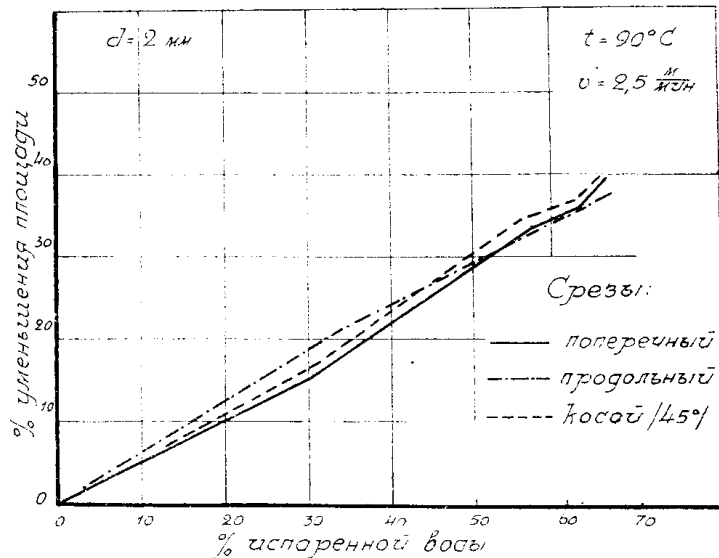
Серия В. —  $t = 105^{\circ}\text{C}$ ,  $v = 12$  мт. в мн.  
высушивание проводилось в сушилке с калорифером.

Серия В включала 4 группы опытов:

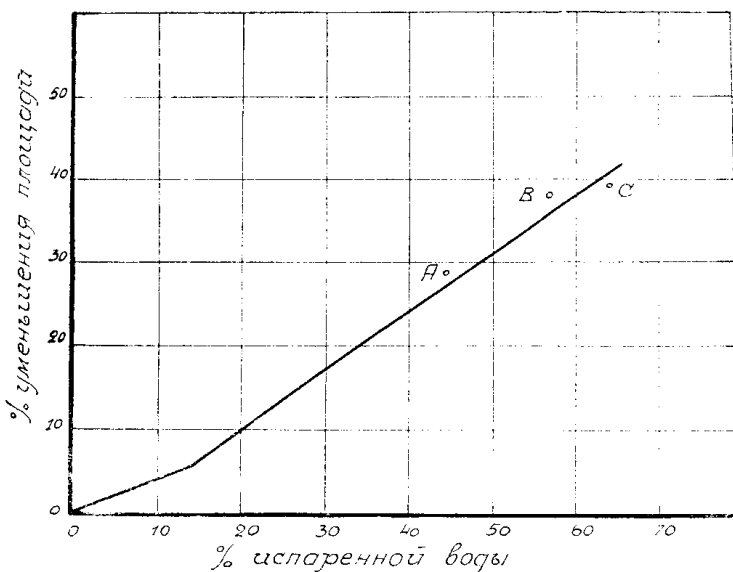
$V_2$ —2,5	с толщиной пластинок	2—2,5	мм.
$V_3$ —3,5	"	"	3—3,5 "
$V_4$ —4,5	"	"	4—4,5 "
$V_5$ —5,5	"	"	5—5,5 "

Каждая группа опытов включала от 10 до 16 опытов с пластинками из различных корчей.

Являлось сомнительным, могут ли результаты опытов быть отнесены к тем условиям, при коих производилось исследование, так как в процессе сушения пластинки свеклы многократно вынимались из сушильной камеры для взвешивания их и определения площади поверхности. Можно предполагать, что этим в процесс сушения вносится известное изменение. Что-



бы выяснить, насколько этим обстоятельством искажается характер изменения площади, были поставлены следующие два опыта (черт. 8 и 9).



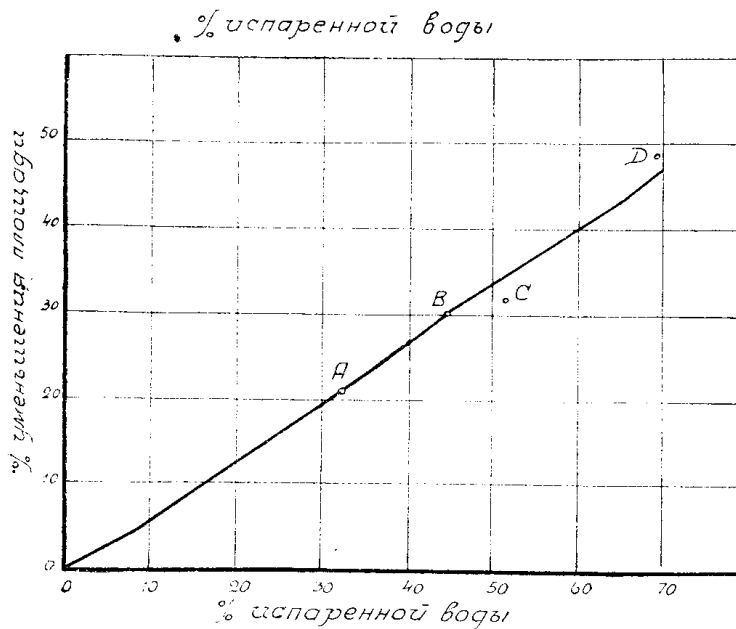
В каждом из опытов несколько одинаковых во всех отношениях пластинок высушивались в одинаковых же условиях. При этом одна из них высушивалась обычным порядком, периодически взвешиваясь и измеряясь, другие же 3—4 взвешивались и измерялись только однажды, (не считая определения веса и площади до сушения), при чем каждая из них давала только одну точку на диаграмме.

Расстояние, на каком располагаются

эти отдельные точки от кривой, даваемой наблюдениями над первой пластинкой, дают величину искажения, вносимого периодическим выниманием первой пластинки из камеры. Как видно из чертежей 8 и 9,



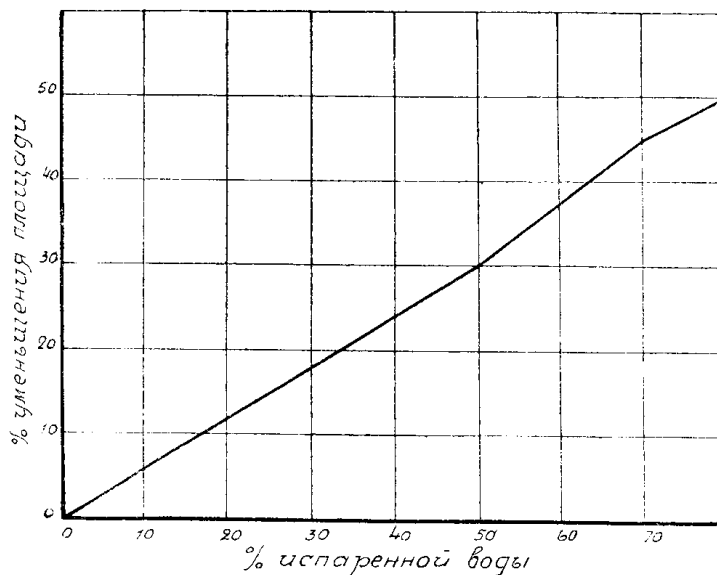
эти точки лежат весьма близко к кривой, т. е. короткое периодическое охлаждение пластинки во время высушивания почти не влияет на характер изменения поверхности пластинки.



Черт. 9. Влияние на процесс изменения площади периодического охлаждения пластинок.

пы, включающей опыты с пластинками одинаковой толщины, при одинаковых условиях высушивания. Описываем обработку опытов серии В при  $d = 2-2,5$  мм.

Получено 13 кривых, дающих зависимость X от Y. Каждая кривая отвечает одному опыту. На основании этих кривых строится кривая средних значений величины Y (изменение площади), отвечающую определенному значению X (количество удаленной воды). (Черт. 10). В таблице 1 даны значения средних величин Y, отвечающих определенным значениям X, при чем X взято через промежутки в 5% испаренной воды. В той же таблице даны значения среднего квадратического отклонения\*) величины Y, которые дают меру



Черт. 10. График изменения площади для опытов группы В2-2,5.

\*) «Средним квадратическим отклонением ряда значений некоторой величины называется корень квадратный из суммы произведений квадратов отклонений этих значений от их средней арифметической на соответствующие этим значениям относительные частоты их». Проф. Романовский, «Элементарн. изложение теории средних», стр. 9, см. также Чупров А. А. «Основн. проблемы теории корреляции», стр. 28.

Обработка результатов опытов, устанавливающих влияние толщины пластинки и темпа высушивания на характер изменения площади велась следующим образом: каждый отдельный опыт давал линию зависимости изменения поверхности от количества удаленной воды: первая величина изменения поверхности откладывалась на оси — Y, вторая — количество удаленной воды, на оси — X. Дальнейшая обработка велась отдельно для каждой груп-

рассеяния значений  $У$ . Из таблицы 1 видно, что величина среднего квадратического отклонения для всех рядов, кроме первого и последнего, приблизительно равна 3,5% от первоначальной площади.

Таблица 1.  
К опытам группы В<sub>2-2,5</sub>.

% испаренной воды	Среднее значение $У$	Средн. квадратич. отклонение	Величина $М$		Пределы наиболее вероятн. значен. $У$
			Абсолют. велнч.	% от средн. $У$	
5	3,5%	1,61%	0,5	14,3	4—3
10	7,0%	3,28%	1,0	14,3	8—6
15	10,0%	3,44%	1,0	10,0	11—9
20	14,0%	3,33%	1,0	7,2	15—13
25	17,0%	3,08%	0,9	5,5	18—16
30	20,0%	3,72%	1,1	5,5	21—19
35	24,0%	3,68%	1,1	4,6	25—23
40	27,0%	3,77%	1,1	4,1	29—26
45	29,0%	3,72%	1,1	3,8	30—28
50	33,0%	3,08%	0,9	2,7	34—32
55	36,0%	3,37%	1,0	2,8	37—35
60	39,0%	3,37%	1,0	2,6	40—38
65	42,5%	3,72%	1,1	2,6	44—41
70	45,0%	4,8%	1,4	3,1	46—44

Для первых рядов эти величины представляют весьма большую долю от величины среднего значения  $У$ , так как значение последнего подвержено большим колебаниям. Это колебание, однако, ни в коем случае не может быть приписано только меняющимся качествам свеклы. Главную роль играет при этом ошибка наблюдений. В самом деле, при определении площади пластинки мы пользовались методом нанесения контура пластинки на миллиметровую бумагу и счетом квадратиков, попавших в контур. При обводке всегда возможно случайное отклонение конца карандаша на величину до 0,25 мм. в ту или другую сторону. Поэтому ошибка по контуру при счете квадратиков может колебаться около  $0,25 \times l$ , где  $l$ —длина периметра контура.

Величина  $l$  при площади пластинки в 1500 мм. равна приблизительно 150 мм. Таким образом, возможная ошибка по контуру равна  $\frac{150 \times 0,25}{1500} 100 = 2,5\%$  от первоначальной площади. Кроме этой ошибки,

нужно учесть также аналогичную ошибку, зависящую от толщины карандаша, составляющую около 1% от первоначальной площади, и случайные ошибки при подсчете площади, лежащей внутри контура. В общей сложности ошибка определения площади может превзойти

$2,5 \pm 1 = 3,5\%$  от первоначальной площади, а следовательно, отклонения от средней величины  $У$ , полученные нами, не превышают ошибки опыта. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что отклонения зависят, главным образом, от ошибки подсчетов и что пределы колебания истинного значения  $У$  много меньше полученного.

Весьма вероятно допущение, что для нормальной (не обсохшей, не испорченной) свеклы одного участка посева, которая подвергалась исследованию, значение  $У$ , отвечающее определенному значению  $Х$ , есть величина постоянная.

При таких условиях можно найти наиболее вероятные значения величин, между которыми лежит истинная величина  $У$ . Размер этих величин определяется на основании вычисления средней ошибки арифметической середины, которую обозначим через  $М^*$ ). В таблице 1 даны значения  $М$  для каждого ряда наблюдений в опытах группы  $В_{2-2,5}$  в абсолютных величинах. В той же таблице даны значения средней ошибки арифметической середины в процентах от соответствующего среднего значения  $У$ . Как видно из таблицы, последняя не превышает для большинства рядов  $5\%$ .

В последней графе таблицы 1 даны пределы, в которых лежат наиболее вероятные значения  $У$ —величины уменьшения площади. Этими пределами будут  $У + М$  и  $У - М$ . В таблице 2 даны величины средней ошибки арифметической середины для различных групп опытов в процентах от соответствующего среднего значения  $У$ .

Таблица 2.

% испаренной воды	Г р у п п а о п ы т о в						
	$В_{2-2,5}$	$В_{3-3,5}$	$В_{4-4,5}$	$В_{5-5,5}$	$А_{2-2,5}$	$А_{3-3,5}$	$А_{4-4,5}$
5	14,3	20,0	26,6	23,4	20,0	6,8	15,0
10	14,3	15,0	11,0	15,4	14,3	6,7	20,0
15	10,0	11,4	12,0	11,1	10,0	6,1	11,4
20	7,2	7,0	9,6	7,0	7,0	6,3	8,5
25	5,5	4,7	10,0	9,4	6,1	5,1	7,1
30	5,5	3,7	7,2	4,3	5,4	4,6	6,5
35	4,6	2,7	5,3	3,5	5,4	3,6	5,3
40	4,1	2,3	3,3	3,3	5,5	2,9	4,4
45	3,8	2,8	3,2	2,6	5,0	2,5	4,0
50	2,7	2,7	4,7	2,1	4,1	2,2	4,1
55	2,8	2,2	3,3	1,9	3,6	2,4	4,5
60	2,6	2,3	2,9	2,0	2,4	2,5	4,1
65	2,6	2,6	2,2	2,6	2,2	3,1	3,7
70	3,1	2,0	—	2,4	2,0	2,6	4,0

\*) „Среднее квадратическое отклонение (ошибка) средней арифметической значеный равно их среднему квадратическому отклонению, разделенному на корень квадратный из числа их“. Проф. Романовский. „Элемент. излож. теории средних“, стр. 27, см. также Авринский—„Курс теории вероятн.“, стр. 84.

В общем величины ошибок, а следовательно, и пределов, в которых лежит искомая величина, для всех опытов являются довольно близкими. Ошибка тем больше, чем меньше значение  $X$ . Для  $X$  более 20 величина ошибки для большинства опытов не превосходит 5%. Из таблицы 2 можно заключить, что результаты отдельных групп опытов равноценны, или почти равноценны, в отношении точности, и что можно сравнивать средние значения  $Y$ , полученные в различных группах опытов. Линии, выражающие искомую зависимость, весьма хорошо передаются для всех опытов уравнением прямой линии, проходящей через начало координат —  $Y = X \times \text{tga}$ .

В таблице 3 приведены значения  $\text{tga}$  для различных групп опытов.

Таблица 3.

Серия А — 90° С		Серия В — 105° С	
Толщина	$\text{tg } \alpha$	Толщина	$\text{tg } \alpha$
2 — 2,5 мм.	0,56	2 — 2,5 мм.	0,66
3 — 3,5 „	0,57	3 — 3,5 „	0,64
4 — 4,5 „	0,62	4 — 4,5 „	0,62
		5 — 5,5 „	0,58

В таблице 4 даны для сравнения величины  $Y$  в различных группах опытов.

Рассматривая таблицы 4, 5 и 6, приходим к следующим выводам:

1. При скорости воздуха в сушилке 10 мт. в мн. и температуре его 105° С при увеличении толщины пластинки величина изменения поверхности уменьшается.

Таблица 4.

% испаренной воды	Толщина пластинок и серия опытов					
	2 — 2,5 мм.		3 — 3,5 мм.		4 — 4,5 мм.	
	А.	В.	А.	В.	А.	В.
5	1,5	3,7	2,4	2,0	2,2	1,3
10	3,4	6,9	4,5	4,1	4,2	4,8
15	6,3	10,3	7,1	7,2	7,3	7,5
20	8,5	13,7	10,0	9,9	10,5	11,4
25	10,6	17,2	13,4	15,0	13,8	15,0
30	14,9	20,2	16,5	18,6	17,1	17,8
35	18,4	23,6	19,8	22,1	20,7	21,2
40	22,0	26,7	23,0	25,7	24,6	24,2
45	26,0	29,3	26,5	29,2	29,7	27,9
50	29,4	33,1	30,0	32,8	32,3	31,8
55	33,1	36,2	33,3	36,2	36,1	34,1
60	36,6	39,3	36,4	39,4	39,1	38,0
65	40,0	42,4	39,2	42,5	42,6	42,0
70	43,7	44,7	41,0	44,6	45,6	46,0

2. При скорости воздуха 2,5 мт. в мн. и температуре 90°С замечается обратное, хотя в последнем случае в меньшей мере, чем в первом.

3. При высушивании при различных условиях пластинок одинаковой толщины замечается следующее:

а)  $d = 4 - 4,5$  мм. значительной разницы в характере изменения поверхности не наблюдается.

в)  $d = 3 - 3,5$  мм. При большей температуре и скорости воздуха, т. е. при большей интенсивности высушивания, наблюдается более значительное изменение поверхности.

с)  $d = 2 - 2,5$  мм. То же самое, что и в предыдущем случае, но еще в большей мере.

4. Тангенс угла, образуемого прямой линией, выражающей зависимость изменения площади поверхности пластинки от количества удаленной воды, колеблется в пределах 0,56 — 0,66.

По техническим условиям не представилось возможным проследить течение процесса уменьшения поверхности при скоростях более чем 12 мт. в мн., но, судя по результатам сравнения опытов серии А и В, при толщине стружки выше 3 мм., большой разницы в протекании процесса наблюдаться не будет.

Результаты произведенных опытов позволяют с большей достоверностью, чем это делалось нами в работе „К вопросу о выборе типа сушил для сахсвеклы“ (1), говорить о площади свеклы в том или ином периоде высушивания, при условии, что исходная величина поверхности высушиваемой резки известна.

Если обозначим начальную поверхность через  $0_0$ , то по испарении  $n\%$  воды площадь будет равна:

$$0_n = 0_0 \left( 1 - \frac{n \times \text{tg } \alpha}{100} \right), \text{ так как изменение площади равно } 0_0 \frac{n \times \text{tg } \alpha}{100}.$$

$$\text{Обозначая } \frac{\text{tg } \alpha}{100} \text{ через } \text{tg } \alpha_0, \text{ имеем } 0_n = 0_0 (1 - n \text{tg } \alpha_0) \dots (4)$$

#### 4. Определение давления $P_1$ — паров воды на поверхности сушеного материала.

Для выяснения величины  $\Delta P = (P_1 - p)$  — разницы давления паров воды на поверхности сушеного материала и в воздухе необходимо знать величину  $P_1$  в каждом периоде сушения. Ниже дается попытка решения этого вопроса теоретическим путем.

На основании литературных данных (IV. стр. 11 и VI. стр. 26) известно, что температура сушеного материала при испарении свободной влаги равна температуре мокрого термометра, помещенного в сушильной камере. Пользуясь этим положением, можно найти давление паров воды на поверхности раствора сахара, зная температуру протекающего над ним воздуха, его влажность и концентрацию высушиваемого раствора.

Примечание: При этом не учитывается влияние структуры свеклы на величину давления паров раствора.

В случае испарения чистой воды, давление ее паров соответствовало бы давлению насыщенного пара воды при температуре влажного термометра. Назовем температуру влажного термометра  $t_0$ , давление насыщенного пара, соответствующее этой температуре,  $P_0$ . Если бы испарению подвергалась не вода, а раствор сахарозы, то очевидно давление водяного пара на поверхности раствора было бы меньше.

Уменьшение может быть подсчитано по уравнению:

$$P_1 = P_0 \frac{N}{N + n} \dots \dots \dots (5)$$

где:  $N$  — количество молекул растворителя,  
 $n$  — „ „ „ растворенного вещества.

Подставив найденное значение  $P_1$  в психрометрическое уравнение, можно приблизительно подсчитать температуру испаряемого слоя раствора.

При высушивании сахарной свеклы при подсчете давления  $P_1$  по уравнению 5 возникают, однако, затруднения, так как свекловичный сок содержит не только сахарозу, но и некоторые количества веществ другого состава и молекулярного веса. Кроме того, лишь условно можно принять, что испарение воды идет равномерно во всех клетках свеклы; вероятнее всего, что в периферийных клетках происходит более быстрое испарение воды, чем в глубинных. Поэтому для подсчета  $P_1$  необходимо сделать допущение, что концентрирование сока идет совершенно равномерно по всей массе свеклы. Основываясь на этом допущении, подсчитаем изменение давления  $P_1$  для конкретного случая.

Исследованная нами свекла имела в среднем следующий состав сока, выраженный в процентах по весу свеклы.

Сухих веществ . . . . .	20,8%
Сахара . . . . .	18,1%
Несахара . . . . .	2,7%

Примем условно, что состав несахара таков, что молекулярный вес его отвечает  $\frac{1}{3}$  молекулярного веса сахара. Следовательно, по величине депрессии 3 весовых части сахарозы эквивалентны одной части несахара. При этом условии, выражая сухие вещества сока в эквивалентах сахарозы, имеем на 1000 гр. сока

$$\frac{18,1 + 3 \times 2,7}{342} = 0,77 \text{ мол. сухих веществ.}$$

По ряду определений в исследованной свекле содержится мякоти в среднем 5%, или на 1000 грамм свеклы 50 грамм. Сахара по предыдущему 181 грамм, Несахара 27 грамм. Всего растворенных сухих веществ и мякоти  $27 + 181 + 50 = 258$  гр. Воды, следовательно, 742 грамма, или в молях  $742 : 18 = 41,2$  моля. Подсчитаем величину коэффициента

$\frac{N}{N + n}$ , который обозначим через  $\tau$  для различных моментов про-

цесса испарения воды. Возьмем интервалы в 50 грамм воды и будем подсчитывать давление в конце последовательных периодов за каждый из которых удаляются 50 грамм воды. В таблице 5-й даны результаты подсчетов. В таблице 5-й, кроме того, даны средние величины коэффи-

циентов давления для различных периодов. Свекла, исследованная нами по составу, была среднего качества.

Таблица 5.

Период.	% удален. воды	$\frac{N}{N+p} = r$	r ср.
1	0%	0,982	0,981
2	5%	0,981	0,980
3	10%	0,980	0,979
4	15%	0,978	0,977
5	20%	0,975	0,974
6	25%	0,973	0,972
7	30%	0,970	0,968
8	35%	0,965	0,963
9	40%	0,960	0,958
10	45%	0,955	0,951
11	50%	0,947	0,940
12	55%	0,932	0,922
13	60%	0,912	0,891
14	65%	0,870	0,813
15	70%	0,756	0,661
	75%	0,565	

Принимая во внимание то обстоятельство, что, как показали подсчеты для свеклы иного состава, колебания последнего мало отражаются на величине указанного коэффициента, можно принять значе-

ния величины  $\frac{N}{N+p}$ , вычисленные выше, за постоянные. Эти коэффи-

циенты, будучи помножены на величину  $P_0$ , дадут давление паров раствора сахара в высушиваемой свекле. Как видно из предыдущего, мы дифференцируем процесс, беря довольно большие интервалы, но весьма легко дать уравнение, выражающее давление паров раствора при непрерывном изменении концентрации раствора, как функцию количества удаленной воды. Обозначим начальное содержание воды в 1000 грамм свеклы в молях через  $N_0$  сухих веществ в пересчете на сахар через  $p_0$  — молей, тогда при удалении  $p\%$  воды по весу свеклы удаляется

$10 \times p$  гр. воды или в молях  $\frac{10p}{18} = 0,555p$  мол.,

$$\text{отсюда } P_1 = P_0 \frac{N_0 - 0,555 \times p}{(N_0 - 0,555 \times p) + p_0} \dots \dots \dots (6)$$

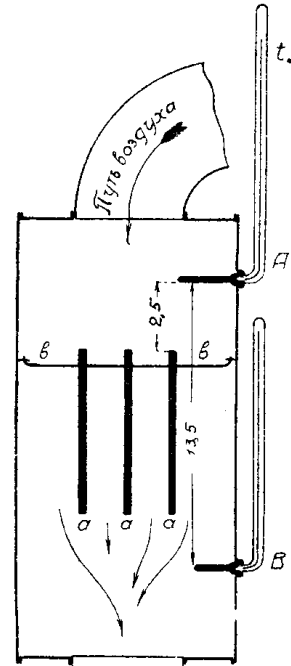
подставляя в уравнение (6) процент удаленной воды, найдем, зная  $P_0$ , соответствующее данному моменту давление  $P_1$ .

Определив  $P_1$  и поверхность —  $O$  высушиваемой свеклы, как функцию количества удаленной воды, перейдем к нахождению коэффициента  $f$  — скорости высушивания в уравнении (3).

### 5. Определение коэффициента скорости высушивания — $f$ .

Экспериментальная часть определения коэффициента  $f$  в уравнении (3) сводилась к высушиванию пластинок свеклы определенного веса, толщины, площади и направления среза в условиях постоянной температуры воздуха, поступающего из калорифера и скорости его, точно определяемых. Прибором, в котором производилось высушивание, служил описанный выше (черт. 2) сушильный аппарат с вертикальной сушильной камерой. Температура воздуха, поступающего из калорифера, в течение опыта отклонялась от средней величины не более как на  $2^\circ \text{C}$  и определялась термометром А. (см. черт. 11). Давление паров воды воздуха определялось при помощи психрометра, установленного на уровне всасывающего отверстия воздуходувки.

Скорость воздуха измерялась анемометром через промежутки времени 20—30 мин. Пластины свеклы  $a$ — $a$ , взвешенные с точностью до 0,01 грамма с общим весом около 20 грамм на проволоке  $b$ — $b$ , подвешивались в сушильной камере (черт. 11). Через промежутки времени 5—15 минут, увеличивавшиеся, по мере высушивания свеклы, пластины вынимались из сушилки и взвешивались с возможной быстротой. Обычно взвешивание продолжалось около 1 мин. Таким образом, если и происходило нарушение режима сушки, то весьма незначительное. Температура воздуха на обоих термометрах сушилки, а также на термометрах психрометра определялась в моменты, предшествующие взвешиванию пластинок.



Черт. 11. Схема сушильной камеры.

На основании данных опыта строились кривые скорости высушивания. Одна из них, относящаяся к опыту с температурой воздуха  $105^\circ \text{C}$  и скоростью его 8 мт. в мин., приведена на черт. 12. На кривой скорости высушивания дана зависимость количества удаленной воды в процентах от первоначального веса свеклы от времени  $z$ .

Коэффициент скорости высушивания высчитывался следующим образом: определялись из опытных данных средние значения величин, входящих в уравнение (3), для последовательных периодов, за которые испаряется по 50 гр. воды на 1 кгр. свеклы\* эти значения подставлялись в уравнение (3), которое решалось относительно  $f$ .

Уравнение 3 для рассматриваемого случая принимает вид:

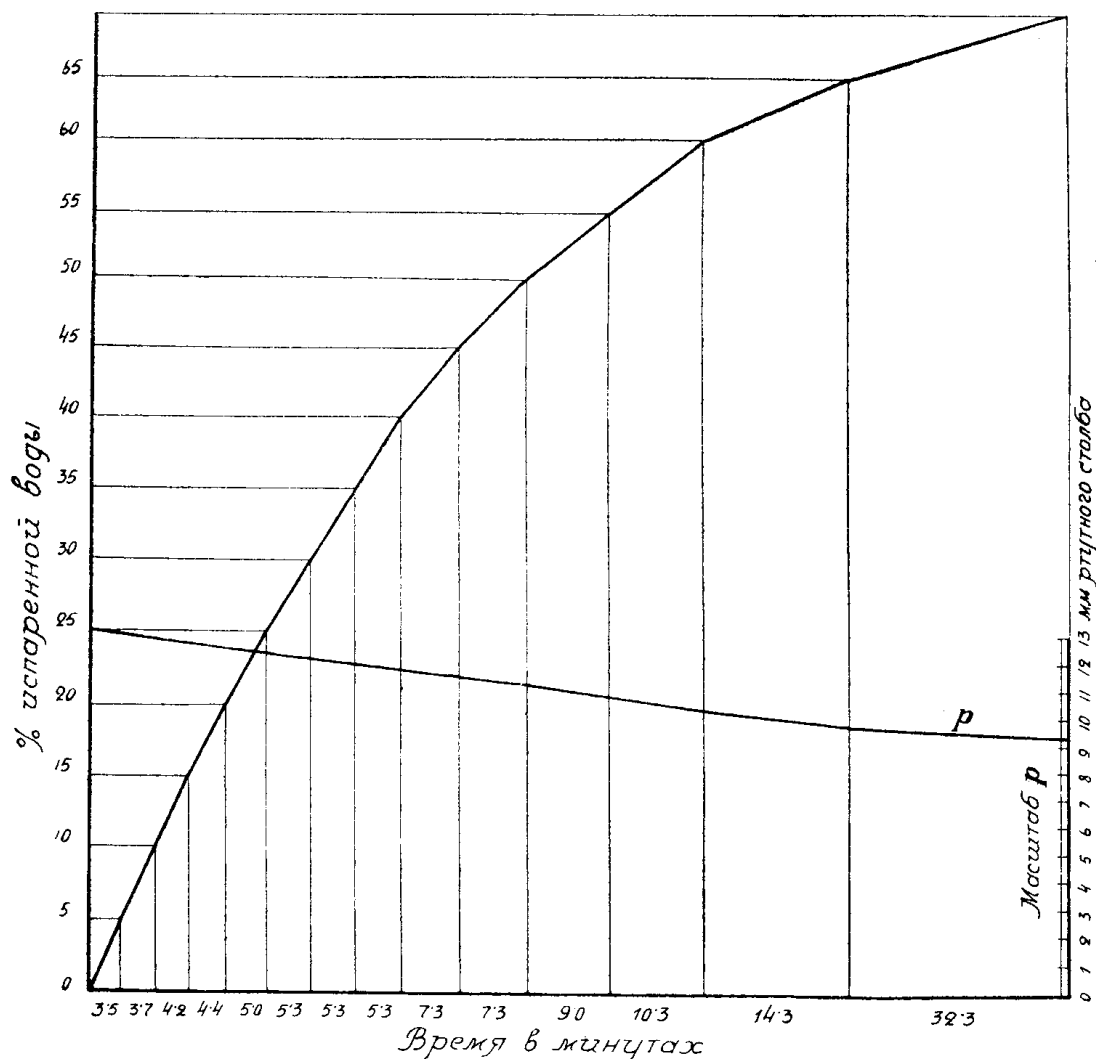
$$f = \frac{50}{\Delta z \times 0 \times \Delta P \times V v (1 + \alpha t_1)} \dots \dots \dots (7)$$

Покажем последовательно способ нахождения значений величин, входящих в уравнение (7). Начнем с  $\Delta z$  — продолжительности рассматриваемого периода.

\*) Иначе говоря 50% от веса взятых пластинок.



На оси  $Y$  диаграммы скорости высушивания (черт. 11) откладываем отрезки, соответствующие по величине 5% по весу свеклы. Проводим из полученных точек линии, параллельные оси  $X$ . Из точек пересечения параллелей с кривой скорости высушивания опускаем перпендикуляр на ось  $X$ . Расстояние между двумя перпендикулярами дает в масштабе диаграммы продолжительность удаления соответствующих 50 грамм воды на 1 кг. свеклы.



Черт. 12. Кривая скорости высушивания.

Площадь 1-го кгр. свеклы в момент начала сушения определялась непосредственным измерением пластинок и пересчетом их площади на 1 кгр. Площадь в течение последовательных периодов сушения определялась из уравнения (4), при чем значение  $\operatorname{tg} \alpha$  бралось, в зависимости от условий опыта и толщины пластинок, из таблицы 3.

Скорость воздуха  $v$  определялась, как указано выше, анемометром.

Что касается величин  $\Delta P = (P_1 - p)$  и  $t_1$ , то их определение несколько более сложно. Величина  $P_1$ , как указано выше, определяется для отдельных периодов через умножения  $P_0$  — давления паров на поверхности чистой воды на соответствующий коэффициент, находимый

из таблицы 5. Следовательно, задача сводится к определению  $P_0$ . Давление же  $P_0$  может быть найдено из психрометрического уравнения\*)

$$p = P_0 - \alpha (t_1 - t_0) \dots \dots \dots (8)$$

здесь  $p$  — парциальное давление паров воды воздуха  
 $t_0$  — температура мокрого термометра, или, что то же, температура материала при испарении чистой воды,  
 $P_0$  — искомое давление паров воды, равное давлению насыщенного пара при температуре  $t_0$ ,  
 $\alpha$  — психрометрический коэффициент, умноженный на барометрич. давление, соответствующее моменту опыта,  
 $t_1$  — температура воздуха, или, что то-же, температура сухого термометра.

Из уравнения (8) имеем:

$$P_0 + \alpha t_0 = p + \alpha t_1 \dots \dots \dots (9)$$

Находим из опыта способом, указанным ниже,  $p$  и  $t_1$ . Тогда в уравнении 9 будут неизвестными  $t_0$  — температура испаряемого слоя, или, что то же — температура мокрого термометра, помещенного в сушилке и  $P_0$  — давление насыщенного пара воды при этой температуре. Зависимость давления насыщенного пара от температуры дается соответствующими таблицами; подбираем, пользуясь таблицами, такие отвечающие друг другу значения давления пара и температуры его, чтобы, по подставлении этих значений в уравнении 9, левая часть стала равной правой. Эти значения давления паров и температуры будут искомыми  $P_0$  и  $t_0$ .

Найдем теперь  $p$  и  $t_1$ .

Парциальное давление водяных паров определялось при помощи психрометра, помещенного вне сушилки на уровне забирающего воздух отверстия воздуходувки. Так как в калорифере влагосодержание воздуха не изменялось, то парциальное давление паров воды —  $p_0$  поступающего в сушилку воздуха, зависящее только от влагосодержания, будет то же, что и вне сушилки. Однако, в сушилке парциальное давление не остается постоянным, ибо влагосодержание воздуха растет за счет испарения воды свеклы, а соответственно растет и парциальное давление водяных паров.

Подсчитаем среднее приращение давления паров воды в воздухе, работающем в сушилке. Для этого рассмотрим тепловые явления, протекающие в нашей сушильной камере. На черт. 11 дана схема сушилки. На схеме показано: А и В термометры, а—а, пластинки свеклы, подвешенные на проволоке б—б.

Расстояние между термометрами составляет 13,5 см. Расстояние от верхнего термометра до верхнего края свекловичной пластинки 2,5 см. Обозначим падение температуры за счет теплоотдачи стенок сушильной камеры на протяжении от верхнего термометра до нижнего через  $\Delta t_1$ , тогда, если допустить, что падение температуры равномерно по всей длине сушилки, падение температуры на 1 см. равно  $\frac{\Delta t_1}{13,5}$ . Нас ин-

тересует средняя температура сушильной камеры и среднее парциальное воздуха в ней, или иначе — средняя температура и парциальное давление воздуха, работающего в сушилке.

\*)  $P_0$  может быть также найдено графически при помощи диаграммы проф. Л. К. Рамзина (v), см. статью инж. Лурье „Как графически определить относительную влажность воздуха по психрометру и конденсационному гигрометру при помощи J—d диаграммы проф. Л. К. Рамзина“ № 6 (29) Извест. Тепл. И-та 1927 год.

Можно допустить, что эта средняя температура и давление установятся на уровне середины высушиваемых пластинок. Поэтому все дальнейшие изыскания будут направлены к тому, чтобы найти температуру и парциальное давление воздуха на уровне середины пластинок.

Пусть длина пластинок равна 1 см. Тогда падение температуры до ее середины равно  $\frac{\Delta t_1}{13,5} \times \frac{1}{2}$ ; общее падение  $t$  от верхнего термометра до середины пластинки  $\frac{\Delta t_1 \times 2,5}{13,5} + \frac{\Delta t_1 \times 1}{13,5 \times 2}$ , где 2,5 — расстояние от верхнего термометра до краев пластинок.

Обычно пластинки брались длиной в 6 см. При этой длине имеем падение температуры до середины пластинки приблизительно  $0,4 \Delta t_1$ . При испарении влаги из свеклы явление осложняется охлаждением за счет испарения, благодаря чему разница температур, показываемых термометрами А и В, возрастает.

Обозначим падение температуры воздуха за счет испарения через  $\Delta t_2$ . Испарение воды происходит по всей длине пластинки. Примем, что испарение идет равномерно по всей длине и что воздух, дойдя до ее середины, теряет  $\frac{\Delta t_2}{2}$  за счет испарения. Один килограмм воздуха, охлаж-

даясь на  $\frac{\Delta t_2}{2}$ , выделяет тепла  $\frac{\Delta t_2}{2} \times 0,24 \text{ cal}$ , где 0,24 теплоемкость воздуха. За счет этого тепла может быть испарено воды, считая, что вода имеет температуру испарения,

$$\Delta d = \frac{\Delta t_2 \times 0,24}{2 \times 0,540} \text{ грамм.}$$

Здесь допущено, что скрытая теплота испарения одного грамма воды в больших калориях в среднем равна 0,540. Согласно уравнения проф. Рамзина (V стр. 10), дающего зависимость между влагосодержанием воздуха и парциальным давлением водяных паров в нем, имеем

$$\Delta p = b \frac{\Delta d}{623 + \Delta d}, \text{ где } b$$

барометрическое давление. Прибавляя найденное таким путем  $\Delta p$  к определенному психрометрически  $p_0$ , находим среднее парциальное давление паров воды в сушилке. Оно равно  $p_0 + \Delta p = p$ .

Из предыдущего не трудно определить  $t_1$  — среднюю температуру воздуха в сушилке в каждый данный момент. Очевидно она равна  $t_0$  — температуре воздуха, приходящего из калорифера, показываемой термометром А, уменьшенной на величину  $0,4 \Delta t_1 + 0,5 \Delta t_2$ .

Итак, обе искомые величины  $p$  и  $t_1$ , определяются через наблюдение над термометрами А и В.

Как это ясно из предыдущего, величина падения температуры  $\Delta t_1$  — зависящая от теплоотдачи стенок камеры, при установившемся тепловом состоянии системы, будет постоянна.

Величина же  $\Delta t_2$ , зависящая от испарения влаги из свеклы, будет меняться, уменьшаясь по мере испарения из свеклы воды и замедления темпа высушивания.

Величина  $\Delta t_1$  определялась из предварительного опыта наблюдением над сушилкой до загрузки в нее свеклы при установившемся тепловом состоянии.

Величина  $\Delta t_2$  определялась во время сушения пластинок, как разница между фактическим падением температуры на протяжении от А до В и найденным ранее падением температуры за счет теплоотдачи.

Зная  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , находим по предыдущему  $p$  и  $t_1$ , а подставляя их в уравнение 9 и решая его, как указано выше, с помощью таблицы для давления водяного пара, находим  $P_0$ , для каждого периода сушки.

Решение уравнения 9, однако, показывает, что изменения  $p$  и  $t_1$  в процессе сушения таковы, что значение  $P_0$ , подсчитываемое по уравнению 9, весьма мало изменяется по своей величине. Поэтому для вычисления давления паров раствора на поверхности сушимых пластинок достаточно определить  $P_0$  для момента начала сушения, приняв его постоянным в течение всей сушки.

Размеры колебания  $p$  в течение процесса сушения показаны на диаграмме 12, графиком, на котором отложены значения  $p$  в различные периоды сушения. Как видно, колебания парциального давления незначительны и разница в начале и в конце сушки составляет всего 3 мм. ртутного столба. Пользуясь этим графиком, весьма удобно находить среднее парциальное давление в течение данного периода. Для этого необходимо только измерить величину ординаты, отвечающую середине периода.

Итак, имеется возможность либо непосредственным измерением, либо косвенно определить среднее значение всех величин, входящих в уравнение (7) для ряда последовательных периодов сушки в течение каждого, из которых считаем эти величины постоянными. Решая уравнение 7, находим  $f$  для каждого периода.

Было проведено две группы опытов. Первая группа с температурой воздуха, поступающего из калорифера, равной  $105^\circ\text{C}$ ; вторая группа с температурой воздуха  $90^\circ\text{C}$ . Первая группа включала 7 опытов; вторая—8 опытов. Скорость воздуха для отдельных опытов колебался около 10 мт. в мн. Толщина пластинок бралась около 3 мм.

На таблицах 6 и 7 даны средние значения  $f$  для последовательных 14 переходов сушения, за которые испаряется в сумме 70% воды по весу свеклы.

Таблица 6.

1-я группа;  $t_0 = 105^\circ\text{C}$ .

Период.	Среднее значен. $f$	Средн. квадратич. откл. абс. велич.	Средн. квадратич. откл. % от $f$
1	0,151	0,021	14,0%
2	0,153	0,021	13,7%
3	0,144	0,021	14,6%
4	0,136	0,023	16,9%
5	0,133	0,012	9,1%
6	0,132	0,023	17,5%
7	0,128	0,012	9,4%
8	0,132	0,011	8,35%
9	0,121	0,021	17,4%
10	0,114	0,013	11,4%
11	0,107	0,019	17,7%
12	0,094	0,021	20,0%
13	0,081	0,013	16,0%
14	0,056	0,024	43,0%

Таблица 7.  
2-ая группа;  $t_0 = 90^\circ \text{C}$ .

Период.	Среднее значен. $f$	Средн. квад- ратич. откл. абс. велич.	Средн. квад- ратич. откл. в % от $f$
1	0,137	0,027	19,7
2	0,140	0,014	10,0
3	0,138	0,015	10,9
4	0,137	0,015	11,0
5	0,137	0,016	11,7
6	0,136	0,015	11,0
7	0,133	0,016	12,2
8	0,130	0,016	12,8
9	0,127	0,019	14,9
10	0,124	0,026	20,1
11	0,121	0,025	20,6
12	0,105	0,014	17,7
13	0,090	0,011	14,6
14	0,062	0,013	21,4

В двух последних графах таблиц 6 и 7 даны величины среднего квадратического отклонения коэффициента  $f$  в абсолютных числах и в процентах от среднего значения коэффициента. Колебания значения коэффициента в наших определениях для большинства рядов не превосходит 10—20% от его среднего значения. Наиболее устойчивые значения коэффициента  $f$  имеет в течение периодов с 2 по 9.

Колебания значительно увеличиваются в последних периодах высушивания, надо полагать, за счет не вполне точной для этих периодов формулы (4), по которой определялась площадь свеклы.

Сопоставляя результаты вычисления коэффициента  $f$  для обеих групп опытов (табл. 6 и 7), находим, что полученные из обоих опытов значения коэффициента  $f$  весьма близки между собой. При чем в опытах с температурой  $105^\circ \text{C}$  коэффициент  $f$  имеет в большинстве случаев меньшее значение, чем в опытах с температурой  $90^\circ \text{C}$ . Это обстоятельство наводит на мысль упростить выражение (7), удалив из него член  $(1 + at)$ , тогда уравнение (7) принимает вид:

$$\Delta w = \frac{50}{\Delta z \times 0 \times \Delta P \times J v} \dots \dots \dots (10)$$

В соответствии с этим вычисленные выше коэффициенты принимают следующие, представленные в таблице 8, значения.

Таблица 8.

Период.	Коэффициенты $f$	
	При $t=90^{\circ}\text{C}$	При $t=105^{\circ}\text{C}$
1	0,183	0,216
2	0,187	0,218
3	0,184	0,206
4	0,183	0,194
5	0,183	0,190
6	0,182	0,189
7	0,178	0,183
8	0,173	0,178
9	0,170	0,173
10	0,166	0,163
11	0,162	0,153
12	0,140	0,135
13	0,120	0,116
14	0,083	0,080

Сравнивая результаты вычисления коэффициентов по уравнению 7 и 10 (табл. 6, 7 и 8), заключаем, что расхождение между результатами вычислений для одинаковых периодов обеих групп опытов одинаково велики как при пользовании формулой 7, так и при пользовании формулой (10). Формула 10, более простая, имеет преимущество перед формулой 7, как более удобная для пользования.

Сравнивая значения коэффициента  $f$ , приведенные в табл. 6, 7 и 8, приходим к следующим выводам относительно коэффициента скорости высушивания свеклы:

1. Коэффициент скорости высушивания в уравнении 3 не является постоянной величиной для разных моментов сушки.

2. Значение его максимально в начальной стадии высушивания и минимально в конечной.

3. Величина коэффициента  $f$ , исчисляемая для отдельных периодов сушки, колеблется для каждого определенного периода, независимо от условий сушки, в довольно узких пределах.

4. Это последнее обстоятельство позволяет рассматривать значение коэффициента  $f$ , как функцию количества удаленной воды.

5. В уравнении 3, оказываются переменными не только  $O$  — поверхность свеклы и  $P$  — разность давлений, но также и  $f$  — при чем все эти величины являются функциями количества удаленной воды, непрерывно уменьшаясь в процессе сушения.

### 6. Вывод уравнения скорости высушивания для свеклы.

Как было указано раньше в главе 4, коэффициенты давления пара— $\gamma$  для различных периодов могут быть для средней по своему составу свеклы приняты постоянными и равными коэффициентам, данным в таблице 5. Так как в вычисление коэффициента  $\gamma$ , вследствие неопределенности состава свеклы, вносится, принятием молекулярного веса несахара равным  $\frac{1}{3}$  молекулярного веса сахара, условность—то нет смысла уточнять эту часть вычислений, всякий раз высчитывая коэффициенты давления. Поэтому примем условно коэффициенты давления, данные в таблице 5, постоянными для всякой здоровой, не подвергавшейся какой-либо порче, свеклы. Как было указано, коэффициент скорости высушивания  $f$  может быть также принят постоянным для данного периода, а следовательно, и произведение  $f$  на  $\gamma$  будет постоянным в каждом периоде. В таблице 9 дано среднее значение коэффициента  $f$  в интервале температур 90—105° С, найденное, как среднее, из значений его в таблице 8.

В той же таблице—9 дано произведение  $\gamma$  на  $f$ , обозначенное через  $D$ .

Таблица 9.

Период.	$f$	$\gamma$	$D = f \times \gamma$
1	0,200	0,981	0,196
2	0,202	0,980	0,198
3	0,200	0,979	0,196
4	0,188	0,977	0,184
5	0,186	0,974	0,181
6	0,185	0,972	0,180
7	0,180	0,968	0,174
8	0,175	0,963	0,169
9	0,171	0,958	0,164
10	0,165	0,951	0,157
11	0,157	0,940	0,148
12	0,138	0,922	0,127
13	0,118	0,891	0,105
14	0,081	0,813	0,066

Коэффициенты  $f$  и  $\gamma$  суть функции количества удаленной воды,—очевидно, и их произведение может быть представлено так же, как функция количества удаленной воды. На черт. 13 изображена графически зависимость  $D$  от степени высушивания, при чем количество испаренной воды дано в % от первоначального веса свеклы и принято, что значение  $D$ , данное в таблице 9, отвечает середине соответствующего

периода. Из чертежа 13 видно, что полученная ломаная линия может быть представлена двумя прямыми линиями,—образующими тупой угол.

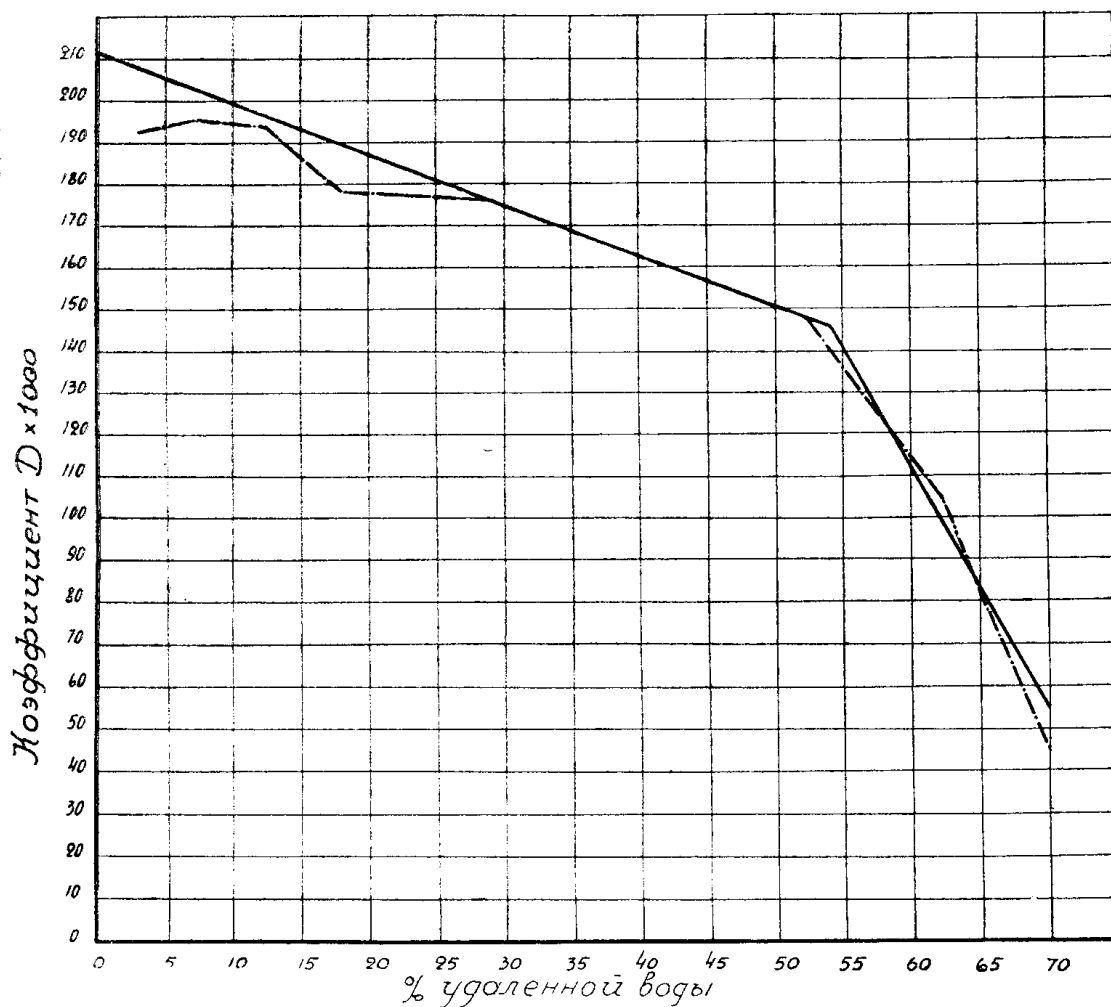
Первая прямая дает зависимость  $D$  от количества удаленной воды в пределах 0—52,5%, вторая—в пределах 52,5—70%. Уравнение первой может быть представлено в виде:

$$D = 0,209 - 0,00105n \dots \dots \dots (11'),$$

уравнение второй—

$$D = 0,448 - 0,0056n \dots \dots \dots (11''),$$

где  $n$ —число процентов, по весу свеклы удаленной воды.



Черт. 13. Зависимость коэффиц.  $D$  от количества удаленной воды.

Общий вид зависимости  $D$  от  $n$  будет такой—

$$D = b - \operatorname{tg} \varphi n \dots \dots \dots (11)$$

При чем

$$b_1 = 0,209$$

$$b_2 = 0,448$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,00105$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,0056.$$



Напишем уравнение (3), отбросив член  $(1 + at)$ , следующим образом:

$$\Delta w = (fP - fp) \times 0 \times \sqrt{v} \times \Delta z \dots \dots \dots (12)$$

По предыдущему  $P = rP_0$ , где  $P_0$  есть величина постоянная, а  $r$  переменный коэффициент. Кроме того,  $D = ir$

Отсюда  $fP = frP_0$  и  $fP = DP_0$ . Произведение  $f \times r$  можно без большой ошибки заменить через  $Dp$  (см. таблицу 9), так как  $p$  величина небольшая и, при умножении на нее, ошибка от замены  $f$  на  $D$  увеличивается незначительно. В таком случае уравнение 11 примет вид

$$\begin{aligned} \Delta w &= D(P_0 - p) \times 0 \times \sqrt{v} \times \Delta z = \\ &= D \times \Delta P \times 0 \times \sqrt{v} \times \Delta z \quad \text{где } P_0 - p = \Delta P \end{aligned}$$

Выразим в последнем уравнении переменные  $D$  и  $0$  через  $n$  из уравнений (11) и (4).

Получаем:

$$\Delta w = \sqrt{v} \times \Delta z \times P \Delta_0 \times (b - tg \varphi n) (0_0 - 0_0 tg \alpha_0 n).$$

Обозначим  $\sqrt{v} \times \Delta P$  через  $\gamma$ , тогда можем написать:

$$\frac{\Delta w}{\Delta z} = \gamma (b - tg \varphi n) (0_0 - 0_0 tg \alpha_0 n)$$

Произведя перемножения в правой части, делая приведения подобных членов и заменяя полученные коэффициенты при различных степенях  $n$  через  $A$ ,  $B$  и  $C$ , получаем

$$\frac{\Delta w}{\Delta z} = An^2 - Bn + C \dots \dots \dots (13),$$

$$\text{где } A = \gamma \times 0_0 \times tg \alpha_0 \times tg \varphi$$

$$B = \gamma \times 0_0 \times (tg \varphi + tg \alpha_0 b)$$

$$C = b \times 0_0 \times \gamma$$

Уравнение 13 дает возможность определить  $\Delta z$

$$\Delta z = \frac{\Delta w}{An^2 - Bn + C} \dots \dots \dots (14).$$

Уравнения 13 и 14 будут тем более точны, чем менее взята величина  $\Delta w$ . Совершенно точно это уравнение (в пределах устанавливаемых точностью экспериментальной части и сделанными допущениями) будет при бесконечно малом значении  $\Delta w$ . Однако, хотя уравнение 14 после замены  $\Delta w$  через  $\Delta n$  принимает при бесконечно малых  $\Delta n$  и  $\Delta z$  весьма удобный для интегрирования вид, — получающееся по интегрировании выражение чрезвычайно сложно и не годится для технических целей. Поэтому оставляем уравнение скорости высушивания в том виде, как оно дано в выражении 14, и будем рассматривать продолжительность  $\Delta z$  периодов, за каждый из которых испаряется по 50 грамм на 1 кг. свеклы. Уравнение 14 в этом случае принимает следующий вид: для первого периода (0 — 52,5%)

$$\Delta z = \frac{50}{A_1 n^2 - B_1 n + C_1} \dots \dots \dots (14'),$$

для второго периода (52,5 — 70%)

$$\Delta z = \frac{50}{A_2 n^2 - B_2 n + C_2} \dots \dots \dots (14'')$$

Подставляя в эти уравнения среднее для рассматриваемого периода  $n$ , найдем продолжительность периода. Решение задачи нахождения теоретической кривой скорости высушивания сводится, таким образом, к следующему:

1) Нахождению коэффициентов  $A_1, B_1, C_1$  и  $A_2, B_2, C_2$ .

2) Вычислению времени  $\Delta z$  по уравнению 14 подстановкой в него этих коэффициентов и среднего для рассматриваемого периода значения  $n$ .

Для примера решим следующую задачу: даны условия высушивания

$$V_v = 2,7 \text{ мт. в мн.}$$

$$(P_0 - p) = 42 \text{ мм.}$$

$$O_0 = 0,81 \text{ кв. мт. на 1 кгр.}$$

$$d = 3 \text{ мм.}$$

$$t_0 = 105^\circ \text{ C.}$$

по величине  $d$  и  $t_1$  находим значения  $\text{tg } \alpha_0$  из таблицы 3  $\text{tg } \alpha_0 = 0,0064$ , по предыдущему

$$\text{tg } \varphi_1 = 0,00105; b_1 = 0,209$$

$$\text{tg } \varphi_2 = 0,0056; b_2 = 0,448.$$

$$\lambda = 2,7 \times 42 = 113,4$$

Находим на основании этих данных значения  $A_1, B_1, C_1$  и  $A_2, B_2, C_2$

$$A_1 = 0,00062$$

$$A_2 = 0,0036$$

$$B_1 = 0,22$$

$$B_2 = 0,78$$

$$C_1 = 19,2$$

$$C_2 = 41,2$$

Составляем уравнения типа 14' и 14''.

$$1) = \frac{50}{0,00062 n^2 - 0,22 n + 19,2}$$

$$2) = \frac{50}{0,0036 n^2 - 0,78 n + 41,2}$$

Подсчитаем по этим уравнениям промежутки времени  $\Delta z$  и сравним их с  $\Delta z$  полученными эмпирически в аналогичных условиях.

Результаты подсчетов, а также  $\Delta z$ , полученные эмпирически для сравнения, приведены в таблице 10.

Таблица 10.

Период.	$\Delta z$ по расчету	$\Delta z$ из опыта	Период.	$\Delta z$ по расчету	$\Delta z$ из опыта
1	2,68 мн.	2,5 мн.	9	4,6 мн.	3,6 мн.
2	2,84 „	2,5 „	10	4,93 „	4,35 „
3	3,02 „	2,6 „	11	5,38 „	4,7 „
4	3,22 „	3,16 „	12	6,07 „	6,0 „
5	3,44 „	3,34 „	13	7,0 „	8,35 „
6	3,67 „	3,54 „	14	10 „	12,7 „
7	3,94 „	3,34 „			
8	4,24 „	3,6 „	Сумма .	65,81 мн.	64,28 мн.

Таблица 10 показывает, что разница между полученными эмпирически значениями  $\Delta z$  и  $\Delta z$ , находимыми по уравнению 14, не велика. Для большинства периодов она не превышает 5—10% от определяемой величины.

Полученное уравнение (14) позволяет весьма просто решать вопрос о скорости сушения в многокамерной сушилке с различными условиями сушки в отдельных камерах.

Для решения задачи, в этом случае, для каждого из поясов сушения, отличающихся условиями, необходимо найти значения коэффициентов А, В и С и составить уравнения типа (14), что не представляет больших затруднений.

Таким образом, кривая скорости высушивания может быть поэтому способу, в отличие от способа, предложенного авторами ранее в статье: „К вопросу о выборе типа сушила для сахарной свеклы“, получена для всякого, дифференцированного по условиям, сушильного процесса.

10 февраля 1929 г.

г. Томск.

### Список литературы.

I. Проф. Лебедев и инж. Стабников. К вопросу о выборе типа сушила для свекловичной стружки и основные методы расчета. Известия Сибирского Технологического Института, 1928 г.

II. Ройтман и Маковецкий. Сушка воздухом и дымовыми газами.

III. Проф. Дешевой М. А. Расчет сушильных устройств для дерева. Изд. III. 1928 год.

IV. Инж. М. Ю. Лурье. Сушилка для типографской краски. Известия Теплотехн. Института. № 10 (33), 1927 г.

V. Проф. Л. К. Рамзин. Расчет сушилок и J—d диаграмма. Известия Тепло-технич. И—та. № 1 (24) 1927 г.

VI. Г. П. Иванов. Расчет естественной циркуляции в сушилках многократного насыщения. 1928 год. Труды Гос. Бюро Металлург. и теплот. конструкций.