В. З. ЖАДАН

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ПРИ ХРАНЕНИИ СОЧНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

**Опечатки,**

замеченные в книге В. З. Жадана «Теоретические основы кондиционирования воздуха при хранении сочного растительного сырья»

| Страница | Строка | Напечатано | Следует читать |
|---|---|---|---|
| 132 | 14-я сверху | $\rho$ | $\rho_1$ |
| | 15-я сверху | $\rho_1$ | $\rho_2$ |
| | 16-я сверху | $\rho_2$ | $\rho$ |

Зак. 125а

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ»
1972

УДК 628.83/.85.001:631.563.002.3

**Теоретические основы кондиционирования воздуха при хранении сочного растительного сырья.** Жадан В. З. 1972.

В книге изложены результаты изучения процессов изменения состояния вентилирующего воздуха в массе сырья.

Освещены закономерности влагообмена при охлаждении и хранении сочного растительного сырья, показано решающее влияние потерь влаги на лежкоспособность сырья, установлены требования, которым должны удовлетворять оптимальные охлаждающие системы, сформулированы условия защиты сырья от потерь влаги и отпотевания. Приведена методика расчета процессов изменения состояния воздуха в хранилищах. Дан анализ современного состояния и рекомендации по совершенствованию техники хранения сочного растительного сырья при использовании естественного и искусственного холода. Приведены результаты опытного хранения новыми способами сахарной свеклы и других видов сырья.

Таблиц 30, иллюстраций 13, список литературы — 217 названий.

Рецензент — д-р техн. наук А. А. ГОГОЛИН.

3-17-5
49—72

# ВВЕДЕНИЕ

К сочному растительному сырью, отличающемуся большим содержанием влаги (свыше 70%) и малым осмотическим давлением клеточного сока, относятся корнеклубнеплоды, овощи и плоды (фрукты). Ежегодно в нашей стране производится около 100 млн. *т* картофеля и почти столько же сахарной свеклы. Не менее 60% сочного растительного сырья поступает на длительное хранение, в процессе которого имеют место значительные потери.

Главной причиной больших потерь сырья являются микробиологические процессы, развитие которых находится в прямой зависимости от степени потери тургора живой растительной тканью. Элементы сочного растительного сырья непрерывно выделяют при дыхании физиологическое тепло. Корнеклубнеплоды, овощи и плоды размещаются в хранилищах насыпью. Отвод физического тепла в фазе охлаждения и физиологического тепла в процессе хранения осуществляется воздухом, что приводит к неизбежным потерям влаги. Многочисленные опытные данные показывают, что решающим условием успешного хранения сочного растительного сырья является максимальная защита его от потерь влаги на всех этапах заготовки, транспортировки и хранения. Из-за недостатка хранилищ с искусственным охлаждением и несовершенства способов хранения ежегодно теряется до 40% урожая фруктов [12].

Разработка научных основ рациональной организации хранения урожая сельскохозяйственного сырья имеет государственное значение. Говоря о задачах, стоящих перед сельским хозяйством, А. Н. Косыгин в своем докладе «Директивы XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 годы» подчеркнул: «Мы обязаны добиться резкого уменьшения потерь продукции на всех стадиях ее производства, хранения и транспортировки, значительно расширить емкости хранилищ и холодильников, обеспечить улучшение складского хозяйства. Надо покончить с таким положением, когда часть продукции, на производство которой затрачен труд наших людей, не доходит до потребителя»[1].

Потери при хранении пищевого сырья в значительной мере отражаются на себестоимости готовой продукции. Выход сахара в

[1] «Материалы XXIV съезда КПСС». М., Изд-во политической литературы, 1971, стр. 157.

конце производственного сезона (в январе—феврале) снижается по сравнению с началом сезона на 20—40%, а иногда и больше. Снижение выхода сахара только на 0,1% к массе переработанной свеклы влечет за собой увеличение себестоимости сахара на 1% [124].

Повышенные потери сырья к концу периода хранения служат главной причиной сезонного характера работы многих пищевых предприятий, что обостряет проблему рабочих кадров и затрудняет эффективное использование оборудования. По этой же причине не обеспечено круглогодичное снабжение населения такими ценными продуктами питания, как свежие плоды и овощи. По данным ЦСУ УССР, на 1 января каждого следующего года колхозы и совхозы республики оставляют для хранения всего 0,5—0,6% собранных плодов [67].

В настоящее время менее 5% сочного растительного сырья хранится с использованием искусственного холода, и роль его еще долгое время будет оставаться лишь вспомогательной. Способы хранения должны быть простыми, надежными и недорогими.

Хранение урожая сельскохозяйственных продуктов представляет собой комплексную проблему и имеет несколько аспектов.

Большие успехи достигнуты советскими учеными в разработке биохимических и технологических основ хранения сырья. Широко известны работы А. И. Опарина, Б. А. Рубина, Л. В. Метлицкого, А. А. Колесника, М. З. Хелемского, Н. В. Сабурова, П. Ф. Сокола, Н. А. Головкина, Г. Б. Чижова, И. Л. Волкинда, М. В. Антонова, С. М. Майстренко Н. А. Палилова, И. И. Варенцова, Е. П. Широкова, Ю. В. Волосова, Б. Д. Игнатьева, Г. Л. Басина, С. Н. Бруева, А. И. Гримма и многих других.

Однако теплофизические процессы, протекающие в массе сырья при хранении, исследованы недостаточно. Оптимальные условия отвода физического и физиологического тепла, которые гарантировали бы максимальное сохранение влаги в сырье, а также теоретические основы кондиционирования воздуха в хранилищах не разработаны.

Одним из наиболее перспективных промышленных способов хранения картофеля и некоторых других видов сырья является навальный способ при активном вентилировании. Высота слоя сырья, пронизываемого вентилирующим воздухом, достигает 3—5 и более метров. Состояние вентилирующего воздуха в массе сырья непрерывно изменяется. Закономерности этого процесса не изучены.

Кондиционирование воздуха там, где оно применяется, сводится к регулированию температуры и влажности приточного воздуха. Изменение влажности вентилирующего воздуха в массе сырья под влиянием тепла дыхания и влаговыделений вызывает нередко значительное отклонение от рекомендуемых норм, приводит к увяданию или отпотеванию сырья, т. е. является основной причиной повышенных потерь даже при использовании искусствен-

ного холода и кондиционирования воздуха. Таким образом, регулирования температуры и влажности только приточного воздуха явно недостаточно, и никакая система автоматического регулирования не обеспечит поддержания равномерного, стабильного и оптимального влажностного режима во всей массе сырья. Автоматизм должен быть заложен в самом способе хранения, иными словами, необходимо кондиционирование внутриштабельного воздуха.

Обеспечение оптимального и стабильного влажностного режима во всей массе сырья при минимальных потерях влаги, предупреждение увядания и отпотевания его рассматриваются в настоящей работе как главные условия успешного хранения сырья. Работа посвящена исследованию тепловлажностных процессов, протекающих в хранилищах, и представляет собой попытку разработки теплофизических основ хранения сочного растительного сырья.

Основной метод исследования — расчетно-аналитический при широком использовании и обобщении фактического материала, имеющегося в литературе, собственных экспериментальных данных и результатов промышленных испытаний, выполненных при содействии и участии М. З. Хелемского и В. И. Ивахнова, которым автор выражает благодарность.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\rho$ — плотность воздуха, *кг/м*$^3$

$\rho_и$ — истинная плотность сырья, *кг/м*$^3$

$\rho_ф$ — физическая плотность сырья, *кг/м*$^3$

$\rho_н$ — насыпная плотность сырья, *кг/м*$^3$

$\lambda$ — теплопроводность сырья, *вт/(м · град)*

$\lambda_с$ — теплопроводность воздуха, *вт/(м · град)*

$a$ — коэффициент температуропроводности сырья, *м*$^2$*/сек*

$t$ — температура сырья, °С

$t_с$ — температура окружающей среды (воздуха), °С

$i$ — удельная энтальпия, *дж/кг*

$r$ — удельная теплота парообразования, *дж/кг*

$q_о$ — удельная энергия дыхания сырья при 0° С, *вт/кг*

$q$ — удельная энергия дыхания сырья при данной температуре, *вт/кг*

$b$ — температурный коэффициент скорости дыхания

$W$ — влаговыделения, *кг*

$\omega$ — концентрация водяного пара, *кг/м*$^3$

$V$ — интенсивность вентилирования или удельный расход воздуха, *м*$^3$*/(кг · сек)*

$\varphi$ — относительная влажность воздуха, доли единицы

$F$ — площадь поверхности, *м*$^2$

$\alpha$ — коэффициент теплоотдачи, *вт/(м*$^2$ *· град)*

$\beta$ — коэффициент массообмена для воды, *м/сек*

$\varepsilon_F$ — массообменная характеристика сырья

$1/\varepsilon_F$ — влагоудерживающая способность сырья

$\varepsilon_в$ — количество воды, вымерзающей при данной отрицательной температуре, доли единицы

$\xi$ — энтальпийный коэффициент

$d$ — геометрический размер (диаметр), *м*

$w$ — скорость воздуха, *м/сек*

$D$ — коэффициент диффузии пара, *м*$^2$*/сек*

$n_о$ — влаговыделения за период охлаждения, %

$n_х$ — влаговыделения при хранении, %

$p_п$ — упругость водяного пара, *н/м*$^2$

$p'$ — барометрическое давление, *н/м*$^2$

$\varepsilon_р$ — коэффициент рабочего времени вентиляторов

$\tau$ — время, *сек*

$Nu = \alpha d/\lambda_с$ — тепловой критерий Нуссельта

$Nu' = \beta d/D$ — диффузионный критерий Нуссельта

$Bi = \alpha \xi d/2\lambda$ — критерий Био

$Fo = 4a\tau/d^2$ — критерий Фурье

# ГЛАВА I

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Применяющаяся обычно система двухступенчатого автоматического регулирования работы вентиляторов предполагает периодическое самосогревание сырья за счет тепла дыхания и последующий отвод его вентилирующим воздухом. Неизбежная при этом неравномерность и нестабильность температурного поля в насыпи плодов и овощей не может быть оценена, если не известны теплофизические характеристики сырья.

Расчет требуемого расхода вентилирующего воздуха в первый, наиболее теплонапряженный период (при охлаждении сырья) связан с большими трудностями. Приходится принимать ряд упрощающих предпосылок, в частности при равномерном и эффективном воздухораспределении не учитывать градиента температур в элементах сырья. Такое допущение не влечет за собой большой погрешности, если $Bi<0{,}3$ и $Fo/Bi>200$. Для проверки указанных условий необходимо располагать данными по теплофизическим характеристикам отдельных видов плодов и овощей.

В зимний период отпотевание насыпи сырья на глубине 0,1—0,4 *м* от верха с последующим возникновением очагов микробиологических поражений представляет собой типичное явление. Расположение и размеры зоны отпотевания зависят от теплопроводности насыпи сырья.

При хранении сахарной свеклы в средней полосе и на юге страны возможно многократное подмораживание и оттаивание корней, что приводит в годы с неустойчивой погодой к огромным потерям из-за образования массовых очагов поражения, особенно в местах, расположенных непосредственно над глухой частью нагнетательных воздуховодов. Как оказалось, одной из причин быстрого распространения зоны загнивания травмированных холодом корней при повторном замораживании является увеличение плотности и коэффициента температуропроводности насыпи.

В настоящее время свыше 95% сочного растительного сырья хранится с использованием естественного холода, между тем технологическими инструкциями запрещается даже кратковременное вентилирование хранилищ в период морозов (независимо от тем-

пературы сырья). Интересные экспериментальные исследования, проведенные в последние годы Е. П. Широковым [183], показали, что «пульсирующее» охлаждение сырья атмосферным воздухом низкой отрицательной температуры весьма перспективно, однако необходима разработка методики расчета безопасных режимов работы вентиляторов в период морозов. Выполнение этой задачи невозможно без данных по теплофизическим характеристикам плодов и овощей.

В справочнике по теплофизическим константам пищевых продуктов приведены данные по теплопроводности и температуропроводности только для картофеля, моркови и столовой свеклы. Но так как эти данные были получены в процессе варки [177], они не могут быть использованы при работе в области низких температур.

Расхождение теплофизических характеристик одних и тех же пищевых продуктов может достигать 40% [45]. Это объясняется не только погрешностью исследований, но и неоднородностью продуктов по содержанию сухих веществ.

Сходные данные, полученные по теплофизическим характеристикам картофеля, моркови и столовой свеклы, М. А. Громов и Г. И. Красовицкая [45] объясняют тем, что они имеют одинаковое анатомическое строение и большое содержание воды.

Н. А. Головкин и Г. Б. Чижов [42] в формуле, составленной по правилу аддитивности, рекомендуют принимать теплопроводность сухих веществ пищевых продуктов равной 0,26 *вт/(м · град)* и указывают, что температуропроводность продуктов колеблется в пределах от $10{,}6 \cdot 10^{-8}$ *м²/сек* до $11{,}7 \cdot 10^{-8}$ *м²/сек*.

В. А. Субботин и В. П. Попков [155] считают возможным принимать теплопроводность сухих веществ виноградного сусла равной 0,31 *вт/(м · град)*.

Практическую возможность применять правило аддитивности подтвердило экспериментальное исследование теплопроводности некоторых жидких пищевкусовых продуктов (ликеров, портвейнов, кагоров, пива, бражки) [76].

При исследовании теплопроводности концентрированного виноградного сока были получены опытные данные [31], не согласующиеся с расчетными по формуле, вытекающей из правила аддитивности.

Многочисленные опытные данные по удельной теплоемкости плодов, овощей и других пищевых продуктов вполне удовлетворительно подчиняются правилу аддитивности, причем удельная теплоемкость сухих веществ, по данным разных авторов, колеблется в пределах от 1260 до 1670 *дж/(кг · град)*.

Почти во всех работах, посвященных исследованию теплофизических характеристик пищевых продуктов, влиянием температуры в пределах от 0 до 20° С пренебрегают, что следует признать правильным. Пищевые продукты даже одного и того же вида различаются большой неоднородностью, поэтому важнейшим и вполне

достаточным показателем, который следует учитывать при определении их теплоемкости, является содержание сухих веществ, а при определении теплопроводности и температуропроводности — также физическая плотность, отражающая степень пористости продуктов.

## НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Связь удельной теплоемкости плодов и овощей с их химическим составом

В состав сухих веществ плодов и овощей входят углеводы, кислоты, зола, причем преобладающее место занимают углеводы. Например, в сухом остатке яблок содержится около 68% фруктозы и глюкозы, а на долю клетчатки приходится 4—5%. В картофеле безазотистые экстрактивные вещества составляют почти 85% безводного остатка, причем в состав экстрактивных веществ входит 82% крахмала.

По приближенному закону Коппа и Неймана молекулярные теплоемкости химических соединений равны сумме атомных теплоемкостей составляющих их элементов. Для атомных теплоемкостей Копп приводит следующие значения [ в *дж/(кг · град)*]:

| | |
|---|---|
| Кислород | 16 750 |
| Водород | 9 630 |
| Углерод | 7 540 |

Расчет удельных теплоемкостей углеводов по закону Коппа и Неймана дает следующие результаты [в *дж/(кг · град)*]:

| | |
|---|---|
| Гексозы | 1450 |
| Сахароза | 1420 |
| Крахмал, клетчатка | 1390 |

Вычисленная по закону Коппа и Неймана удельная теплоемкость лимонной кислоты составляет 1260 *дж/(кг · град)*.

Удельная теплоемкость сухих веществ плодов и овощей с достаточной для практических целей точностью может быть принята равной 1400 *дж/(кг · град)*.

Используя правило аддитивности, автор получил теоретическую формулу для расчета удельной теплоемкости плодов и овощей

$$c = 100 \cdot (41{,}9 - 0{,}28\, n_c), \qquad (1)$$

где $c$ — удельная теплоемкость плодов и овощей, *дж/(кг · град)*;
$n_c$ — содержание сухих веществ, %.

Отклонение расчетных величин от имеющихся в литературе [173] опытных данных для яблок, капусты, картофеля, моркови, столовой свеклы и томатов не превышает 2%.

## Зависимость упругости водяного пара над клеточным соком плодов и овощей от их криоскопической температуры

При изучении механизма влагообмена живой растительной ткани с воздухом необходимо оценить возможную депрессию клеточного сока как раствора в самом неблагоприятном случае — при нарушении клеточной структуры ткани (например, при механическом травмировании).

Относительное понижение упругости пара над раствором, осмотическое давление и понижение температуры замерзания — взаимосвязанные явления, подчиняющиеся законам Рауля. Во всех трех случаях определяющим фактором является молярная концентрация растворенного вещества, так как диссоциация на ионы кислот и солей усиливает указанные явления — ионы выступают в данном случае в роли молекул. С другой стороны, нельзя не считаться с тем, что законы Рауля справедливы только для разбавленных растворов. Таким образом, при использовании законов Рауля следует вводить две поправки — на диссоциацию части молекул и на концентрацию. Однако, если имеются опытные данные в отношении одного какого-либо явления, например понижения температуры замерзания, можно прогнозировать остальные два, так как упомянутые поправки количественно примерно одинаковы для всех трех явлений.

В качестве показателя, косвенно характеризующего кажущуюся молярную концентрацию клеточного сока плодов и овощей, удобно использовать криоскопическую температуру. Определение ее не встречает серьезных трудностей, и в литературе имеются соответствующие данные.

Согласно закону Вант-Гоффа, осмотическое давление растворенного вещества в растворе равно тому газовому давлению, которое это вещество имело бы, если бы оно в виде газа занимало при той же температуре тот же объем, что и раствор:

$$p_{oc} = \varepsilon_м \varepsilon' RT ,$$

где $p_{oc}$ — осмотическое давление растворенного вещества, *н/м*²;
$\varepsilon_м$ — кажущаяся молярная концентрация растворенного вещества, *моль* на 1000 *кг* раствора (молекулярная масса — в *кг*);
$\varepsilon'$ — поправочный коэффициент, учитывающий повышенную концентрацию раствора;
$R$ — универсальная газовая постоянная;
$T$ — температура, ° К.

Понижение температуры замерзания раствора по закону Рауля выражается уравнением

$$\Delta t_з = 1{,}86\, \varepsilon_м' \varepsilon' ,$$

где $\Delta t_з$ — понижение температуры замерзания клеточного сока, ° С;
$\varepsilon'_м$ — концентрация растворенного вещества, *моль* на 1000 *кг* растворителя.

Решение последних двух уравнений приводит к расчетной формуле

$$p_{oc} = 40\,(100 - n_c)\,\Delta t_з\,T. \qquad (2)$$

В картофеле содержится в среднем 25% сухих веществ [174]. $\Delta t_з = 1{,}3°$ С. По формуле (2) $p_{oc} = 10{,}6 \cdot 10^5$ *н/м*$^2$. По данным А. Н. Сутулова (см. [149]), осмотическое давление клеток клубней картофеля при температуре 274,5° К составляет $9{,}1 \cdot 10^5$ *н/м*$^2$.

Согласно другому закону Рауля, степень понижения упругости пара над раствором (депрессия) равна относительной молярной концентрации растворенного вещества:

$$\frac{p''_{по} - p''_{п}}{p''_{по}} = \frac{\varepsilon_м\,\varepsilon'}{\varepsilon_м\,\varepsilon' + \varepsilon_в'},$$

где $p''_{по}$ — насыщающая упругость пара над чистым растворителем, *н/м*$^2$;
$p''_{п}$ — насыщающая упругость пара над раствором, *н/м*$^2$;
$\varepsilon'_в$ — концентрация растворителя (воды), *моль* ($\varepsilon'_в = 1000/18$).

Из предыдущего $\varepsilon_м \varepsilon' = \Delta t_з / 1{,}86$. Таким образом,

$$\frac{p''_{по} - p''_{п}}{p''_{по}} = \frac{1}{1 + \dfrac{103{,}3}{\Delta t_з}}.$$

Коэффициент депрессии раствора, т. е. поправочный коэффициент к насыщающей упругости пара над растворителем, выражается уравнением

$$\varepsilon_к = \frac{p''_{п}}{p''_{по}} = \frac{103{,}3}{103{,}3 + \Delta t_з}. \qquad (3)$$

Температура замерзания распространенных видов плодов и овощей лежит в пределах от —0,5 до —2,5° С. Равновесную относительную влажность воздуха над ними даже в случае нарушения клеточной структуры можно выразить, согласно уравнению (3), величиной 0,985 ÷ 0,995, что хорошо согласуется с данными Х. Ленигера [36], который нашел, что для большинства овощей отношение равновесной упругости пара к насыщающей составляет 0,990 ÷ 0,995.

Этот важный вывод использован нами ниже при изучении влагообмена плодов и овощей с воздухом.

## Количество воды, вымерзающей в плодах и овощах при данной отрицательной температуре

В районах с устойчивыми морозами в зимний период некоторые виды сырья можно хранить в замороженном состоянии при использовании естественного холода — это сокращает потери. На протяжении многих лет успешно применяется замораживание сахарной свеклы в северо-восточных районах страны по методу, разработанному под руководством проф. М. З. Хелемского во Всесоюзном научно-исследовательском институте сахарной промышленности.

Для проектирования вентиляторных установок необходимо знать энтальпию замороженного сырья при данной температуре. Численное значение энтальпии определяется температурой сырья, его теплоемкостью и количеством воды, вымерзающей при данной температуре.

Для расчета количества вымерзающей воды используется закон Рауля. Можно считать, что равновесное состояние остающегося незамерзшим клеточного сока определяется при каждой данной отрицательной температуре его кажущейся молярной концентрацией.

Обозначим переменное значение температуры сырья через $t$, криоскопическую температуру через $t_{кр}$.

Пусть в 100 *кг* сырья содержится $n_c$ *кг* сухих веществ. На основании закона Рауля можно записать

$$\frac{n_c \cdot 1000\,\varepsilon' \cdot 1{,}86}{\mu\,(100 - n_c)} = 0 - t_{кр},$$

$$\frac{n_c \cdot 1000\,\varepsilon' \cdot 1{,}86}{\mu\,(x - n_c)} = 0 - t,$$

где $\mu$ — кажущаяся молекулярная масса сухих веществ, *кг*;
$x$ — количество незамерзшего клеточного сока, оставшегося после вымораживания части воды, *кг*.

Разделив первое уравнение на второе, получим

$$\frac{x - n_c}{100 - n_c} = \frac{t_{кр}}{t}.$$

Выражение в левой части уравнения представляет собой долю оставшейся в жидком состоянии воды. Следовательно, относительное количество воды, вымерзающей при данной отрицательной температуре, можно вычислить по формуле

$$\varepsilon_в = 1 - \frac{t_{кр}}{t}. \qquad (4)$$

Эта формула проверялась экспериментально на сахарной свекле и свекловичном соке в 1961—1962 гг. [57]. Количество вымерзающей воды определялось калориметрическим методом [58]. Отклонение опытных величин от расчетных не превышало 10%. Г. Б. Чижов [176] на различных пищевых продуктах показал практическую приемлемость расчетов по формуле, вытекающей из закона Рауля.

Формула (4) пригодна для области температур выше криогидратной и служит для определения количества свободной воды, переходящей в твердое состояние. Понятие «связанная вода» не очень четко. По Максимову, это вода, которая не может быть отнята замораживанием при температуре ниже минус 10° С. Я. Куприянов относит к связанной воде воду продукта, не замерзающую при температуре до минус 50° С (см. [36, стр. 43]).

По данным Б. А. Рубина, Л. С. Любарской и И. В. Гулидовой [133], в сахарной свекле содержится в среднем 2,9% связанной воды. При хранении сахарной свеклы в замороженном состоянии температура ее обычно бывает выше минус 10° С, поэтому формула (4) для нее вполне приемлема.

## Энтальпия пищевых продуктов

При проектировании вентиляторных установок для свекловичных кагатов в северо-восточных районах страны возникает необходимость в расчете расхода холода на замораживание свеклы. Для этой цели удобно располагать таблицей энтальпии сырья в зависимости от его криоскопической температуры и температуры хранения.

При расчетах достаточно знать разность энтальпий (в начальный и конечный момент времени), поэтому энтальпию можно отсчитывать от любого состояния. В качестве такого состояния принимаем условия при 0° С.

Для температуры ниже криоскопической расчетная формула, по которой могут быть составлены таблицы энтальпии различных видов пищевых продуктов, имеет следующий вид:

$$i = 41{,}9\left[(100 - 0{,}67\,n_c)\,t - \left(1 - \frac{t_{кр}}{t}\right)(100 - n_c)\,r_з\right], \qquad (5)$$

где $i$ — энтальпия продукта при температуре $t$, которая берется со своим знаком;

$r_з$ — теплота затвердевания воды, *дж/кг* [$r_з = (160 + t) \cdot 2{,}1 \cdot 10^3$].

## Истинная и физическая плотность пищевых продуктов. Пористость продуктов

Теплопроводность и температуропроводность пищевых продуктов в значительной мере зависят от степени их пористости, т. е. от количества внутритканевых газов [87]. Наличие воздуха в плодах и овощах служит основной причиной несоблюдения правила

аддитивности в отношении теплопроводности и температуропроводности.

По данным А. Ф. Джафарова и др. [50], количество внутритканевых газов в плодах и овощах может достигать 20—30% объема. Даже в картофеле, обладающем высокой плотностью, содержится 4—9% газов [80].

Степень пористости пищевых продуктов может быть приблизительно вычислена при сопоставлении их физической и истинной плотности. Физическая плотность представляет собой отношение массы продукта к его действительному (физическому) объему. При вычислении истинной плотности масса делится на объем материала продукта, который меньше физического объема на величину объема внутритканевых газов и газов, содержащихся в семенной полости.

Истинную плотность с достаточной точностью можно найти как средневзвешенную величину, если известно содержание сухих веществ и их плотность. В табл. 1 приводятся значения плотности компонентов сухих веществ плодов и овощей при температуре 15—25° С.

Таблица 1

| Компонент | $\rho$, $10^{-3}$ кг/м³ | Компонент | $\rho$, $10^{-3}$ кг/м³ |
|---|---|---|---|
| Сахароза . . . . | 1,59 | Кислоты | |
| Глюкоза . . . . | 1,56 | яблочная . . . | 1,60 |
| Фруктоза . . . . | 1,67 | лимонная . . . | 1,54 |
| Крахмал . . . . | 1,60 | Соли органических кислот . . . | 1,75—1,85 |
| Клетчатка . . . | 1,53 | | |

Считая истинный объем материала продукта равным сумме объемов воды и сухих веществ, а также приняв на основании табл. 1 среднюю плотность последних равной 1600 кг/м³, получим приближенную расчетную формулу

$$\rho_{и} = \frac{267\,000}{267 - n_{с}}, \qquad (6)$$

где $\rho_{и}$ — истинная плотность.

Физическая плотность жидких пищевых продуктов растительного происхождения близка к истинной [56].

В 1962 г. были проведены экспериментальные исследования плотности свекловичных корней (20 опытов) и свекловичного сока (9 опытов). Отклонение опытных величин от расчетных не превышало 7% для свеклы и 0,3% для сока. Оказалось, что доброкачественность сока не влияет на его плотность. Увеличение темпера-

туры от 5 до 20° С в интервале изменения концентрации от 5 до 25% приводит к уменьшению плотности сока менее чем на 0,2%.

В табл. 2 приведены значения физической плотности некоторых видов плодов и овощей, полученных автором в 1968 г. с помощью весов Реймана [174], принцип действия которых основан на использовании закона Архимеда.

Таблица 2

| Сырье | $n_c$, % | $10^{-3}\ \rho_ф$, кг/м³ | Сырье | $n_c$, % | $10^{-3}\ \rho_ф$, кг/м³ |
|---|---|---|---|---|---|
| Яблоки . . . . . | 13,2 | 0,879 | Свекла столовая | 12,9 | 1,043 |
| Виноград . . . . . | 16,4 | 1,036 | Морковь | 9,5 | 1,029 |
| Груши . . . . . | 15,3 | 1,009 | Капуста белокочанная | 8,0 | 0,702 |
| Айва . . . . . | 14,2 | 0,892 | Томаты | 5,3 | 0,993 |
| Картофель . . . . | 19,2 | 1,080 | Баклажаны | 5,3 | 0,716 |

Степень пористости пищевых продуктов (в долях единицы) может быть приблизительно выражена уравнением

$$\varepsilon_{пор} = 1 - \frac{\rho_ф}{\rho_и}, \qquad (7)$$

где $\rho_ф$ — физическая плотность.

Расчет по уравнениям (6), (7) и данным табл. 2 приводит к следующим значениям пористости (в %): яблоки — 16,4, капуста — 31,9, картофель — 4,6. Капуста и баклажаны отличаются высокой пористостью, что отрицательно отражается на их теплопроводности и температуропроводности.

## Насыпная плотность плодов и овощей

Скважистость плодов и овощей играет важнейшую роль при их хранении, так как требуемый микроклимат необходимо создавать и поддерживать в самой насыпи сырья. Скорость воздуха в насыпи сырья при активном вентилировании зависит от соотношения между физической и насыпной плотностью сырья.

Многие виды плодов и овощей имеют форму, приближающуюся к форме шара. Насыпную плотность $\rho_н$ в этом случае можно выразить приближенно отношением объема шара к объему куба с ребром, равным диаметру шара. Если ввести поправочные коэффициенты $\varepsilon_ш$ и $\varepsilon_з$, учитывающие соответственно отклонения от формы шара и наличие посторонних механических загрязнений, получим приближенную расчетную формулу

$$\rho_н = \frac{\pi}{6}\ \rho_ф\ \varepsilon_ш\ \varepsilon_з .$$

В большинстве случаев $\varepsilon_ш\varepsilon_з = 1{,}15$. При этих условиях

$$\rho_н \approx 0{,}6\,\rho_ф\,. \qquad (8)$$

По опытным данным Б. Опхюза [118], насыпная плотность картофеля 640 *кг/м*³. А. А. Холмквист [172] приводит почти такое же значение — 670 *кг/м*³. Насыпная плотность капусты, по данным П. Ф. Сокола [150], 430 *кг/м*³. Для сахарной свеклы М. З. Хелемский на основании многочисленных опытов считает возможным принять насыпную плотность 650 *кг/м*³. Отклонение расчетных величин, полученных по формуле (8), от приведенных опытных не превышает 4%.

Вопреки распространенному мнению насыпная плотность практически не зависит от абсолютного значения размера отдельных элементов сырья. Этот вывод хорошо согласуется с опытными данными. П. Ф. Сокол [150] приводит опытные значения насыпной плотности для четырех размеров клубней картофеля, из которых видно, что уменьшение размера клубней в 3—5 раз вызывает увеличение насыпной плотности картофеля менее чем на 7%.

Более существенное значение имеет степень полидисперсности сырья. При наличии крупных и мелких объектов насыпная плотность сырья может увеличиться на 15—20%. Такое же влияние оказывают мелкие посторонние механические примеси. Указанные два фактора не имеют существенного значения в практике хранения сырья, так как по технологическим нормам в одно и то же хранилище не рекомендуется закладывать сырье разных помологических сортов, разных размеров, с большим содержанием механических загрязнений.

Скважистость насыпи плодов и овощей представляет собой часть объема насыпи сырья, занятую воздухом, и может быть выражена уравнением (в долях единицы)

$$\varepsilon_{скв} = 1 - \frac{\rho_н}{\rho_ф}\,. \qquad (9)$$

По П. Ф. Соколу [150], скважистость картофеля при $\rho_н$ 614 и 653 *кг/м*³ составляет соответственно 0,43 и 0,38. Расчет по формуле (9) в первом случае дает 0,43, во втором — 0,39, т. е. результаты почти совпадают.

## ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ

В 1961—1962 гг. автором было проведено экспериментальное исследование теплофизических характеристик сахарной свеклы. Температуропроводность определялась первым методом регуляр-

ного режима, разработанным Г. М. Кондратьевым [85]. Обобщение полученных данных привело к расчетной формуле

$$a = \frac{5{,}54 \cdot 10^{-8} (1 - 0{,}012\, n_c) \cdot (267 - n_c)}{100 - 0{,}67\, n_c} \cdot \qquad (10)$$

Расхождение между опытными и расчетными величинами не превышало 10%.

На основании опытных данных по температуропроводности, теплоемкости и удельному весу свеклы, связанных зависимостью $a = \frac{\lambda}{c\rho_ф}$, были получены значения теплопроводности свеклы. Обобщение этих данных привело к следующей расчетной формуле (погрешность до 6%):

$$\lambda = 0{,}62 - 0{,}0074\, n_c\,, \qquad (11)$$

где $\lambda$ — теплопроводность свеклы, *вт/(м · град)*.

Как показали опыты, температуропроводность и теплопроводность свекловичных корней не подчиняется правилу аддитивности, но оно приближенно соблюдается в отношении свекловичного сока. Теплопроводность сухих веществ свекловичного сока близка к 0,15 *вт/(м · град)*.

В 1968 г. было проведено экспериментальное определение температуропроводности и теплопроводности некоторых видов плодов и овощей. Был использован первый метод регулярного режима. Опыты на свекле показали, что применение оболочки для образцов продукта с плотной структурой необязательно, поэтому она применялась только для капусты. Прессформа, с помощью которой вырезались опытные образцы капусты, одновременно служила и оболочкой, причем принимались меры, предотвращающие попадание воды в *а*-калориметр [85]. При получении образцов для исследования температуропроводности капусты обеспечивались условия, при которых тепловой поток в *а*-калориметре шел в направлении, нормальном к кроющим листьям, что имитировало условия при отводе физического и физиологического тепла в хранилищах.

Теплопроводность находилась расчетным путем по температуропроводности, удельной теплоемкости и плотности. Плотность определялась, как указано выше, с помощью весов Реймана, удельная теплоемкость — по формуле (1).

Результаты опытов сведены в табл. 3, в которой приводятся теплофизические характеристики плодов и овощей.

Анализ табл. 3 показывает, что применение правила аддитивности при подсчете теплопроводности и температуропроводности плодов и овощей дает тем бо́льшую ошибку, чем выше их пористость.

Таблица 3

| Сырье | $n_c$, % | $a$, $10^8$ м²/сек | $\rho$, $10^{-3}$ кг/м³ | $c$, $10^{-3}$ дж/(кг·град) | $\lambda$, вт/(м·град) |
|---|---|---|---|---|---|
| Яблоки | 13,2 | 14,55 | 0,88 | 3,82 | 0,49 |
| Виноград | 16,4 | 13,13 | 1,04 | 3,84 | 0,52 |
| Груши | 15,3 | 13,38 | 1,01 | 3,81 | 0,51 |
| Айва | 14,2 | 13,65 | 0,89 | 3,79 | 0,46 |
| Картофель | 19,2 | 12,73 | 1,08 | 3,79 | 0,52 |
| Свекла столовая | 12,9 | 18,04 | 1,04 | 3,83 | 0,48 |
| Морковь | 9,5 | 12,72 | 1,03 | 3,82 | 0,50 |
| Капуста белокочанная | 8,0 | 12,24 | 0,70 | 3,97 | 0,34 |
| Томаты | 5,3 | 13,88 | 0,99 | 4,04 | 0,55 |
| Баклажаны | 5,6 | 11,60 | 0,75 | 4,03 | 0,35 |

При ориентировочных расчетах, когда погрешность 10—15% считается допустимой, теплопроводность плодов и овощей с малой плотностью может быть вычислена по следующей формуле, полученной на основании правила аддитивности с учетом их пористости и теплопроводности межтканевых газов:

$$\lambda = \frac{\rho_ф}{\rho_и}(0{,}57 - 0{,}004\, n_c) + 0{,}25\left(1 - \frac{\rho_ф}{\rho_и}\right). \qquad (12)$$

По опытным данным многих исследователей, влияние температуры на теплопроводность и температуропроводность пищевых продуктов незначительно, а на удельную теплоемкость настолько мало, что им можно пренебречь. А. М. Моисеев [107] установил, что повышение температуры с 25 до 35° С приводит к увеличению теплопроводности яблочного сока, содержащего 20% сухих веществ, на 4,5%, причем с понижением температуры это расхождение уменьшается. Теплопроводность картофеля, моркови и столовой свеклы, найденная экспериментально в процессе варки, т. е. в кипящей воде [45], превышает полученные нами значения на 15—20%. Причина такого большого расхождения — в заметном росте теплопроводности воды при значительном, не типичном для режима хранения увеличении температуры [1], а также в удалении межтканевых газов и частичном замещении их водой (в крупных порах).

[1] При повышении температуры воды от 20 до 100° С теплопроводность ее увеличивается на 1,4%.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании закона Коппа и Неймана и правила аддитивности получена теоретическая формула для расчета теплоемкости плодов и овощей, которая хорошо согласуется с результатами опытов автора и других исследователей.

2. На основании законов Рауля получена простая формула для вычисления равновесной влажности воздуха над клеточным соком плодов и овощей по их криоскопической температуре. Установлено, что отношение равновесной упругости пара над клеточным соком плодов и овощей к насыщающей упругости пара составляет $0{,}985 \div 0{,}995$. Этот теоретический вывод автора хорошо согласуется с данными Ленигера, который оценивает указанное отношение для овощного сырья величиной $0{,}990 \div 0{,}995$.

3. Получены теоретические формулы для расчета истинной и насыпной плотности, пористости и скважистости плодов и овощей, которые удовлетворительно согласуются с опытными данными автора и других исследователей. Экспериментально определена физическая плотность некоторых видов плодов и овощей.

4. Приведены результаты экспериментального исследования температуропроводности и теплопроводности сахарной свеклы, плодов и овощей. Предложены обобщающие расчетные формулы. Установлено, что температуропроводность и теплопроводность плодов и овощей не подчиняются правилу аддитивности, что объясняется наличием в них межтканевых газов.

5. Предложена формула для приближенного вычисления температуропроводности и теплопроводности плодов и овощей, обладающих большой пористостью.

6. Разработана методика расчета расхода холода при хранении сахарной свеклы в замороженном виде, что практикуется в северо-восточных районах страны.

## ГЛАВА II

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛАГООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ И ХРАНЕНИИ СОЧНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

### РОЛЬ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ПРИ ХРАНЕНИИ СЫРЬЯ

Эффективные способы хранения плодов и овощей должны удовлетворять следующим двум основным требованиям:

1) поддержание оптимальной температуры при высокой равномерности и стабильности температурного поля в массе сырья;

2) максимальная защита сырья от потерь влаги с одновременным предотвращением отпотевания его.

А. А. Колесник подчеркивает, что размеры естественной убыли при хранении бывают значительно ниже тех отходов, которые имеют место вследствие поражения плодов и овощей микроорганизмами и физиологическими заболеваниями. Он пишет: «Большинство плодов и овощей содержит в составе тканей 85% и более воды. Однако сравнительно небольшие потери влаги приводят к нарушению биохимических процессов, усилению распада органических веществ, ослаблению устойчивости плодов и овощей по отношению к микроорганизмам, ухудшению качества и сокращению сроков хранения» [80, стр. 128].

Даже у растений в вегетативный период интенсивное испарение влаги (транспирация) рассматривается в целом как отрицательное явление, несмотря на то что с ним связан подвод питательных веществ к листьям из грунта. В своей знаменитой лекции «Борьба растений с засухой» К. А. Тимирязев так охарактеризовал процесс транспирации: «В тех размерах, в каких он обыкновенно совершается в природе, он может быть скорее рассматриваем как неизбежное зло, чем как необходимое физиологическое отправление» [158, стр. 165].

Установлено, что увядание сахарной свеклы усиливает дыхание и гидролитический распад сахарозы под влиянием инвертазы, а также уменьшает сопротивление корня заболеваниям [130]. Потери сахара и усушка в больших кагатах меньше благодаря более повышенной равновесной влажности кагатного воздуха. В одном из опытов за 3,5 месяца усушка составила 1,9% к массе уложенной свеклы против 1,0% в кагате высотой, в 1,6 раза большей [54].

Ветровое вентилирование сахарной свеклы в кагатах небольших размеров приводит к увяданию прежде всего мелких корней и потере ими иммунитета к заболеваниям. Это наглядно иллюстрируют данные табл. 4 [130], в которой показано влияние размера свекловичных корней на интенсивность загнивания при хранении.

Таблица 4

| Масса корня, *кг* | Гнилая масса, % к массе корней | Масса корня, *кг* | Гнилая масса, % к массе корней |
|---|---|---|---|
| 0,10 | 6,4 | 0,85 | 3,3 |
| 0,25 | 4,9 | 1,25 | 1,6 |
| 0,45 | 2,7 | 1,45 | 0,9 |

Б. А. Рубин [130] получил данные, характеризующие связь между начальной степенью увядания и потерями в результате двухмесячного хранения сахарной свеклы (табл. 5).

Из табл. 5 видно, что степень поражения свекловичных корней микроорганизмами и потери сахара увеличиваются параллельно начальной степени увядания. Даже сравнительно небольшое (7%)

увядание повышает потери сахара почти в 3 раза по сравнению с потерями сахара свеклой, поступившей на хранение с нормальным тургором.

Таблица 5

| Степень увядания свеклы, % | Количество корней, пораженных гнилью | Потери сахара, % к массе свеклы |
|---|---|---|
| Контроль (свекла свежая) | — | 1,25 |
| 7 | 37,2 | 3,43 |
| 13 | 55,1 | 5,14 |
| 17 | 65,8 | 7,13 |
| 23 | 96,0 | 8,93 |

Согласно теории А. И. Опарина, в живой клетке ферменты находятся одновременно в двух состояниях: адсорбированном (связанном с протоплазмой) и свободном. Первые активизируют синтетические процессы, вторые — только процессы распада. Увядание, вызывающее нарушение структуры протоплазмы, влечет за собой переход ферментов из адсорбированного состояния в свободное, чем и объясняются повышенные потери сырья.

С. Н. Бруев [22] отмечает, что высокая влажность меньше влияет на снижение качества свежих плодов, чем излишняя сухость воздуха, и ссылается на широко известный положительный опыт хранения сырья в ледяных складах Крылова.

В литературе имеются противоречивые указания о допустимой высоте слоя сырья в хранилищах при размещении его навалом и активном вентилировании. Для картофеля называют величины от 3 до 8 *м*. Причина столь большого расхождения объясняется разной степенью увядания клубней в сравниваемых вариантах. Правильно отмечает Ю. В. Волосов, что даже при высоте слоя 1,5 *м* иногда к весне на нижних клубнях наблюдаются вмятины, вызванные потерей тургора [30].

Плоды и овощи обладают сравнительно слабой влагоудерживающей способностью вследствие малого содержания гидрофильных коллоидов, поэтому во всех РТУ свежесть указывается как важнейший признак качества плодов и овощей. Увядшие плоды к продаже не допускаются [50].

Особенно чувствительны к увяданию лиственные овощи, обладающие большой площадью поверхности, приходящейся на единицу массы. Если многие плоды и овощи внешне сохраняют нормальный тургор при испарении 2—3% влаги, щавель теряет тургор даже при снижении содержания воды всего на 1,0—1,5% [61].

С. Дженеев [51] подчеркивает, что даже слегка увядшие корнеплоды не пригодны для хранения.

Наш опыт хранения сахарной свеклы показывает, что особенно слабой влагоудерживающей способностью обладают корнеплоды, выращенные на поливных землях. Это отмечается как закономерное явление: «При избыточном увлажнении почвы плоды и овощи содержат больше воды, обладают повышенной испаряемостью и сохраняются хуже вследствие быстрого увядания» [50, стр. 57].

Широко известны хорошие результаты хранения сырья в траншеях и буртах со снегованием, которые отличаются высокой равновесной влажностью воздуха. Естественная убыль в них, так же как в ледяных складах, 0,1—0,2% против 0,5—0,6% в холодильниках [52].

Механически травмированные корнеклубнеплоды требуют «лечебного периода», в течение которого должны поддерживаться повышенная температура и влажность воздуха. При низкой влажности воздуха опробковевший слой на ранах может быть прерывистым [63].

В последние годы проводилось много исследований по хранению плодов и овощей в упаковке из полимерных материалов. В целом отмечаются положительные результаты опытов, причем подчеркивается, что равновесная влажность воздуха в упаковке близка к 100% [84].

Повышенная равновесная влажность воздуха в массе сырья и небольшая естественная убыль наблюдаются и при хранении овощей по сравнительно новому способу, получившему название омывающей, или огибающей, вентиляции. Сущность его заключается в бесконтактном (в значительной мере) отводе физиологического тепла вентилирующим воздухом. Последний пропускается между герметичными стенками закромов. По сведениям, имеющимся в литературе, этот способ получил распространение в США и других странах.

Между равновесной влажностью воздуха, естественной убылью и отходами существует достаточно закономерная зависимость. Как правило, с увеличением влажности воздуха до пределов, не вызывающих отпотевания, потери и отходы уменьшаются. Об этом свидетельствуют, например, результаты сравнительных опытов по хранению яблок в разной упаковке [94]. Плоды упаковывали в стандартные ящики по 22—25 *кг* нетто обычным способом. Некоторые ящики выстилали полиэтиленовой пленкой или вставляли в них пленочный мешок. При хранении плодов урожая 1961 г. температурно-влажностный режим характеризовался следующими показателями: температура во всех случаях 0—2° С. Относительная влажность при хранении яблок в обычных ящиках 87—89%, в упаковке из полиэтиленовой пленки 96%. Естественная убыль и отход плодов во втором случае были в среднем в 2 раза ниже, чем в контроле.

Наши опыты на одесской торгово-закупочной базе «Торгмортранс» в 1967—1968 гг., а также на сахарных заводах на протяжении ряда лет показали, что прорастание корнеклубнеплодов

зависит от их тургора: с понижением тургора прорастание усиливается. По-видимому, это является общей закономерностью. П. Ф. Сокол отмечает, что при низкой температуре высокая влажность воздуха не усиливает прорастания, и делает вывод о благоприятном влиянии повышенной влажности воздуха в целом на качество картофеля: «Пятилетние опыты показали, что высокая влажность воздуха не оказала стимулирующего влияния на развитие болезней по сравнению с контролем. Наоборот, установлена несколько большая устойчивость клубней, хранившихся при высокой влажности» [149, стр. 93].

Говоря о положительном влиянии повышенной влажности воздуха на качество корнеклубнеплодов, мы имеем в виду здоровое сырье с хорошим исходным тургором. По нашим опытам с картофелем, морковью и сахарной свеклой восстановление тургора в атмосфере с влажностью воздуха 100% без непосредственного контакта с капельножидкой влагой невозможно, хотя по этому вопросу в литературе нет единого мнения. Наши опыты подтвердили предположение П. Ф. Сокола о том, что «Всасывать пары воды клубни, по-видимому, не могут» [149, стр. 28].

Особенно большими бывают потери при хранении плодов и овощей в мелких охлаждаемых хранилищах в южных районах страны вследствие типичной для них низкой равновесной влажности воздуха. Она понижается при неполной загрузке хранилищ и применении сухих деревянных ящиков. При перевозках плодов и овощей в ящиках масса их может увеличиваться в 2—3 раза. То же бывает при хранении, если начальная влажность тары низкая.

Часто наблюдающееся отрицательное влияние пониженной влажности воздуха на качество сырья дало основание Н. Ф. Шепс [181] прийти к выводу, что правильный режим хранения картофеля и овощей заключается в сочетании постоянной, близкой к нулю температуры и высокой относительной влажности воздуха (97—98%).

Это в целом верное утверждение нельзя, однако, распространять на все виды сырья и все способы хранения. В тех случаях, когда повышенная влажность воздуха приводит к отпотеванию сырья и образованию длительно не исчезающей сплошной водяной пленки даже на отдельных элементах сырья, потери резко возрастают. Это подтверждается, в частности, опытом хранения винограда в штабелях с укрытием воздухонепроницаемым материалом и без укрытия [204]. Температура в камере была 1° С, влажность воздуха 85—95%. Естественная убыль от усушки и дыхания при повышенной влажности (под укрытием) оказались меньше, однако общие потери возросли за счет загнивших ягод.

Влажность воздуха, приближающаяся к 100%, может дать хорошие результаты для большинства видов сырья при хранении его в очень тонком слое, когда каждый объект омывается воздухом, но не возникает конденсации водяных паров. На практике же вен-

тилирующий воздух пронизывает насыпь сырья определенной (часто значительной) высоты. Подача воздуха с влажностью, близкой к 100%, в случае повышенной влагоудерживающей способности сырья, например лука, приводит к тому, что в восходящий поток воздуха поступает недостаточное количество влаги, относительная влажность его быстро падает и создается крайне неравномерное влажностное поле в массе сырья, причем одновременно могут наблюдаться отпотевание и увядание в разных местах по высоте. В литературе имеется много примеров, когда при хранении одних и тех же видов сырья максимальную убыль массы одни исследователи наблюдали в нижней, другие — в верхней части насыпи сырья.

Как будет показано ниже, для каждого вида сырья должна быть своя оптимальная влажность воздуха, причем возможно ее научное обоснование. Оптимальной следует называть такую относительную влажность вентилирующего воздуха, которая не меняется по высоте насыпи сырья. Ей соответствует постоянное отношение тепловыделений к влаговыделениям, а оно определяется теплом дыхания, массообменной характеристикой сырья и относительной влажностью приточного воздуха.

Изложенное позволяет утверждать, что оптимизация влажностного режима в массе сырья должна стать важнейшим средством совершенствования существующей техники хранения.

## МЕХАНИЗМ ВЛАГООБМЕНА ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ С ВОЗДУХОМ

Влагообмен листьев растений с окружающей воздушной средой, осложненный физиологическими процессами, носит название транспирации. Транспирация растений детально освещена в монографии Н. А. Максимова [95]. Математическое описание ее оказалось невозможным из-за большого числа трудно поддающихся учету факторов, к которым относятся прежде всего «игра устьиц» и солнечная радиация.

Влагообмен плодов и овощей с воздухом отличается относительной стабильностью во времени, малой интенсивностью и подчиняется закономерностям, которые можно приближенно выразить математически.

Обобщение работ по транспирации растений, защитной роли кожуры плодов и овощей, а также по применению уравнения Дальтона к пищевым продуктам [19, 36, 37, 40, 47, 70, 72, 80, 95, 96, 111, 118, 135, 145, 152, 167, 211] дает основание для следующих заключений:

1. Не вся поверхность плодов и овощей участвует во влагообмене. Кожура их покрыта воскоподобным веществом кутином. Влагообмен осуществляется через просветы (своеобразные «кратеры») в защитном кутикулярном слое, которые носят название устьиц, чечевичек, лакун. Они связаны с межклетниками.

2. Основное количество воды, теряемой в окружающую среду, испаряется в межклетниках с выстилающих их влажных стенок мезофилла.

3. Для некоторых видов плодов и овощей (цитрусовые, томаты) локальный характер испарения влаги выражен предельно четко: влаго- и газообмен осуществляется практически только через зону, расположенную у плодоножки.

4. Связь межклетников с атмосферой можно осуществить искусственно путем проколов или срезов, как это делал в своих опытах Дарвин [95]. Срез головки у корнеплодов, неизбежный при удалении ботвы, равносилен как бы «открытию ворот» к внутренней системе межклетников.

5. Стенки клеток, состоящие из протоплазмы и поддерживающей ее целлюлозной оболочки, обладают свойством полупроницаемости, т. е. легко пропускают через себя воду и не пропускают растворимых в воде веществ. С влажных стенок межклетников испаряется чистая вода, поэтому образующийся в них пар практически является насыщенным.

6. За весь период охлаждения и хранения плоды и овощи теряют обычно до 5% содержащейся в них воды. Влагообмен происходит настолько медленно, что стенки межклетников все время остаются влажными. Типичного для первой фазы сушки углубления зоны испарения с самого начала процесса [37] при охлаждении и хранении сочного растительного сырья не происходит. В связи с этим не наблюдается также понижения уровня воды в порах, связанных с межклетниками. Длина «водяных нитей», питающих межклетники, не меняется, поэтому не увеличивается кривизна менисков и капиллярные явления не оказывают заметного влияния на упругость пара в межклетниках.

7. Так как живая растительная ткань непрерывно выделяет энергию дыхания, равновесная температура ее в воздухе, насыщенном влагой, несколько выше температуры воздуха. Возникающая при этом разность температур, измеряемая, по нашим наблюдениям, десятыми и сотыми долями градуса, обусловливает испарение влаги в окружающую среду даже в том случае, если относительная влажность воздуха равна 100%.

8. Защитный покровный слой плодов и овощей состоит из омертвевших клеток. Типичная для листьев растений «игра устьиц» отсутствует.

Приведенная схема процесса влагообмена косвенно подтверждается следующими фактами:

1. Увядшие клубни картофеля, морковь и столовая свекла при потере 5—7% массы не восстанавливали тургор в воздухе с относительной влажностью 100%. Исследуемые объекты размещались на сетке в эксикаторе с водой, который устанавливался в воздушный термостат. В эксикаторе поддерживались аэробные условия. Экспозиция при температуре 25° С составляла 10—20 суток. Потеря массы исследуемых объектов превышала величину, соответ-

ствующую интенсивности дыхания. Аналогичные опыты проводились в сезоне 1967—1968 гг. на одесской базе «Торгмортранс». Восстановить тургор картофеля удалось только при размещении его над контейнером с загнившими клубнями. Увядшие клубни в этом случае покрывались видимой пленкой воды, которая периодически исчезала вследствие колебаний температуры в хранилище и возникновения поперечных токов воздуха. Спорадическое смачивание клубней привело к увеличению их массы за 30 суток на 4%. В дальнейшем этот процесс стабилизировался и масса картофеля в опытном контейнере практически не менялась (качество картофеля с восстановленным тургором к концу срока хранения было удовлетворительным).

Невозможность восстановления тургора увядших элементов сырья в атмосфере насыщенного влагой воздуха подтверждает неприемлемость теории сорбционных процессов к живой растительной ткани с ненарушенным эпидермисом и свидетельствует о практически насыщающей упругости пара над ней.

2. При исследовании влагообмена сахарной свеклы с воздухом было обнаружено следующее явление: температура в стереометрическом центре корнеплодов при невысокой влажности воздуха (70—80%) была ниже на десятые или сотые доли градуса, чем на поверхности. Подобное явление наблюдал сотрудник Украинского научно-исследовательского института садоводства В. М. Найченко в опытах по хранению слив. По его данным, при температуре в камере —0,6° С температура кожуры слив в контрольном ящике была +0,8° С, под кожурой +0,3, у косточки +0,1° С. В опытной упаковке из полиэтиленовой пленки температура кожуры слив была +0,3°, у косточки — минус 0,4° С. Измерение производилось медь-константановой термопарой, изготовленной и протарированной в Агрофизическом институте. Хотя приведенные расхождения локальных температур необъяснимо велики, сам факт возникновения температурного градиента в плодах при стационарном режиме отвода тепла дыхания не вызывает сомнений. Описанное явление можно объяснить испарительным охлаждением внутренней массы живых растительных объектов, сообщающейся с внешней средой через систему межклетников. Наиболее четким указанное явление должно быть у плодов, газообмен которых совершается через зону у плодоножки. Примером могут служить томаты и цитрусовые плоды. Установлено, что «увядание у цитрусовых протекает иначе, чем у семечковых. У цитрусовых в первую очередь вянет мякоть, а кожица остается свежей. Это приводит к образованию мешковидных пухлых плодов и сильному усыханию мякоти» [3, стр. 60]. Л. В. Метлицкий [106] также подчеркивает, что вблизи плодоножки у цитрусовых потери воды наибольшие. А. А. Колесник указывает: «В наших опытах было найдено, что газы из зрелых плодов мандаринов, апельсинов и лимонов выделяются через место прикрепления плодоножки» [80, стр. 161].

Вовлечение во влагообмен внутренней массы является, по-видимому, характерной особенностью пищевых продуктов как капиллярнопористых тел. На XII Международном конгрессе по холоду А. М. Эль-Шербиени (ОАР) сообщил о своих наблюдениях, приведших к заключению о существовании микроскопических пор в толще замороженных продуктов. Замороженное филе трески, обернутое в несколько слоев алюминиевой фольги, хранилось при —29° С. После 6 лет хранения установлено снижение содержания влаги в глубинных слоях мышечной ткани с 78,55 до 75,68%. Этот факт свидетельствует о том, что сублимация льда происходит не только в поверхностных, но и в глубинных слоях продукта, из которых водяной пар удаляется по имеющимся в замороженной ткани порам [137].

Наблюдавшийся нами градиент температур в корнеплодах сахарной свеклы можно объяснить особенностями ее клеточной структуры. Б. А. Рубин отмечает, что свекла состоит из крупных клеток и межклетников больших размеров [130].

Испарение влаги с влажных стенок межклетников и последующий выход ее через своеобразные «кратеры» (чечевички, устьица, лакуны) в атмосферу позволяют с известным приближением применить к влагообмену сочного растительного сырья с воздухом общую теорию тепло- и массообмена капиллярнопористых тел с окружающей газовой средой. Рабочей моделью влажного капиллярнопористого тела является, как известно, мелкозернистый изодисперсный кварцевый песок, смоченный водой. В соответствии с указанной теорией общая величина влажностного потока состоит из потока, вызванного концентрационной диффузией, потока, определяемого термодиффузией, и молярного потока [115].

Термодиффузионный поток обусловлен наличием в пограничном слое температурного градиента. Он заключается в диффузии газа с большой молекулярной массой (воздуха) в направлении потока тепла, а газа с меньшей молекулярной массой (пара) против направления потока тепла. При направлении тепла от влажной поверхности к воздуху термодиффузия оказывает на концентрационную диффузию тормозящее действие. Наличие температурного градиента и сам процесс испарения вызывают молярное движение влажного воздуха в пограничном слое, которое ускоряет диффузионный влагоперенос. Интенсивность молярного потока пропорциональна отношению барометрического давления к парциальному давлению воздуха.

Наибольшей составляющей потока массы является доля его, обусловленная концентрационной диффузией. Доля термодиффузионного потока растет с увеличением разности парциальных давлений водяного пара, но даже при $\Delta p_{\text{п}} = 2{,}7 \cdot 10^4$ *н/м*$^2$ не превышает 1% [115]. При такой сравнительно большой разности давлений водяных паров доля молярного потока массы колеблется в пределах от 0 до 5% [115].

Учитывая крайне низкие значения разности упругостей пара и весьма медленное протекание влагообмена при хранении плодов и овощей, на основании изложенного выше можно ограничиться учетом только концентрационной диффузии влаги.

Влагообмен плодов и овощей с воздухом с достаточной точностью может быть описан уравнением Дальтона с введенным нами поправочным коэффициентом $\varepsilon_F$, учитывающим долю поверхности кожуры, участвующей во влагообмене:

$$W = \beta F \varepsilon_F (\omega'' - \omega_c'' \varphi) \tau, \tag{13}$$

где $W$ — количество испаряющейся воды, *кг*;
$\beta$ — коэффициент массообмена для воды, *м/сек*;
$F$ — площадь поверхности плодов (овощей), $м^2$;
$\varepsilon_F$ — массообменная характеристика элементов сырья, представляющая собой долю общей поверхности кожуры, участвующей во влагообмене;
$\omega''$ — насыщающая концентрация водяного пара над поверхностью сырья, $кг/м^3$;
$\omega_c''$ — насыщающая концентрация водяного пара в воздухе, $кг/м^3$;
$\varphi$ — относительная влажность воздуха, доли единицы.

Показатель этот несколько условен, но введение его в уравнение Дальтона правомерно. Общую площадь поверхности кожуры можно представить как состоящую из двух частей: активной $F\varepsilon_F$ и непроницаемой для водяных паров $F$ $(1-\varepsilon_F)$.

Уравнение (13) устанавливает зависимость влаговыделений от величины площади поверхности сырья, которая подтверждается Н. В. Сабуровым, М. В. Антоновым и Е. П. Широковым: «Испарение влаги для плодов, овощей, картофеля одного и того же сорта пропорционально их удельной поверхности» [141, стр. 64].

Почти при всех промышленных способах хранения сочного растительного сырья отвод тепла производится вентилирующим воздухом независимо от системы вентиляции — естественной или принудительной. При этом неизбежно возникает отвод влаги. Если он совершается в минимальном размере, способ хранения можно считать эффективным. Однако на практике часто наблюдается избыточное, а следовательно, вредное, не обусловленное необходимостью вентилирование. Такое избыточное вентилирование является одной из основных причин повышенных потерь сырья и будет подробно рассмотрено в гл. IV.

При исследовании закономерностей влагообмена плодов и овощей с воздухом мы исходим из того, что этот процесс является неизбежным злом, и поэтому предполагаем, что вентилирование сырья производится постольку, поскольку необходимо отводить физическое или физиологическое тепло. Такой подход к изучению влагообмена позволяет использовать аналогию между тепло- и влагообменом, получить достаточно простые расчетные формулы и вскрыть основные закономерности этого сложного процесса. Уравнение теплового потока записывается в следующем виде:

$$Q = (\alpha \Delta t + \beta \varepsilon_F \Delta \omega r) F \tau, \tag{14}$$

где $Q$ — физическое, или физиологическое тепло, *дж*;
$\alpha$ — конвективный коэффициент теплоотдачи, *вт/(м² · град)*;
$\Delta t$ — температурный напор на границе сырье—воздух, °С;
$r$ — теплота испарения ($r = 2{,}5 \cdot 10^6$ *дж/кг*);
$\Delta \omega$ — перепад концентраций водяного пара на границе сырье—воздух, *кг/м³*.

Первый член в скобках представляет собой явное тепло, второй — скрытое.

При отводе физического тепла $\Delta t = \Delta t_л$, где $\Delta t_л$ — средний логарифмический температурный напор. Следует отметить, что это не обычный перепад температур по поверхности теплообмена, а перепад по времени усредненных температур. При регулярном режиме охлаждения и малом подогреве воздуха перепад температур изменяется во времени по экспоненциальному закону, поэтому для определения его можно пользоваться известным уравнением средней логарифмической величины. Приближение к этим условиям создается в случае применения больших удельных расходов воздуха [свыше 100 *м³/(т · ч)*], которые по опыту голландских специалистов [118] обеспечивают хорошие результаты. При малых расходах воздуха для разработки методики обоснования $\Delta t_л$ требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

При отводе тепла дыхания и стабильном режиме $\Delta t = t - t_c$, где $t$ — температура поверхности сырья, °С; $t_c$ — температура окружающей воздушной среды, °С.

Величина $\Delta\omega$ по аналогии с температурным напором вычисляется как средняя логарифмическая (при охлаждении) или средняя арифметическая (при хранении).

Разделив уравнение (14) на уравнение (13), получим

$$\frac{Q}{W} = \varepsilon_{пр} = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{1}{\varepsilon_F} M + r, \qquad (15)$$

где $\varepsilon_{пр}$ — тепловлажностная характеристика процесса изменения состояния вентилирующего воздуха в массе сырья, *дж/кг*;
$\frac{1}{\varepsilon_F}$ — коэффициент, характеризующий влагоудерживающую способность сырья;
$M$ — отношение потенциала переноса явного тепла и влаги на границе сырье—воздух;

$$M = \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \qquad (16)$$

Показатель $\varepsilon_{пр}$ широко используется в технике кондиционирования воздуха. Он играет важнейшую роль при изучении закономерностей формирования температурного и влажностного полей в насыпи сырья и представляет собой количество тепла, поступающего в вентилирующий воздух, которое приходится на 1 *кг* выделяющегося водяного пара. Как будет показано в гл. III, тепловлажностная характеристика процесса в насыпи сырья имеет оптимальное значение, равное $6{,}24 \cdot 10^6$ *дж/кг*.

В уравнение (15) входит известное соотношение Льюиса $\alpha/\beta$, которое на основании приближенной аналогии между тепло- и влагообменом может быть выражено количественно. Теоретически $Nu/Nu'=1$; в рассматриваемом случае на основании ряда исследований [18, 38, 68, 73, 77, 93, 114] можно принять $Nu/Nu'=1{,}02$, откуда с погрешностью менее 10% $\alpha/\beta=1150$ *дж/(м³·град)*.

Входящая в уравнение (15) массообменная характеристика сырья определяется экспериментально. Для указанной цели нами был использован прибор, основанный на исследовании влагообмена в форсированных условиях.

Опыт показал, что результаты определения $\varepsilon_F$, повторяются лишь в том случае, если процесс охлаждения сырья протекает не слишком быстро. В противном случае происходит углубление зоны испарения. Опытным путем установлено, что при $Bi/Fo<2$ указанное явление не наблюдается.

Прибор для исследования массообменных характеристик одиночных объектов и насыпи сырья показан на рис. 1. Он состоит из вентилятора *1* с электродвигателем *2*, бачка *3*, полого цилиндра *4*, на четырех подставках *5* с крючками *6* для подвешивания одиночного объекта, сетки *7* для насыпи сырья и фланца *8*, жестко соединенного тремя стойками *9* со съемной крышкой *10*, герметизируемой уплотнительной прокладкой *11*. Пространство *12* между цилиндром *4* и стенками бачка *3* служит для заполнения мелко дробленым льдом.

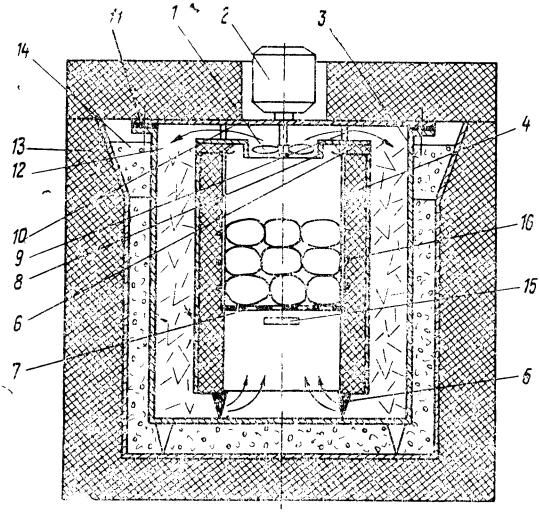



Рис. 1. Прибор для определения массообменных характеристик сырья.

Для устранения вредного влияния внешних притоков тепла, помимо тепловой изоляции *13*, предусмотрено зарубашечное пространство *14* для льдо-водяной смеси. Скорость воздуха измерялась электроанемометром *15* марки АТЭ-2 и регулировалась изменением частоты вращения электродвигателя вентилятора. Изменение скорости воздуха в пределах 0,1—0,3 *м/сек* на результатах опыта не отражалось. При исследовании насыпи мелких объектов (ягоды) соблюдалось условие, при котором для предотвращения «пристенного» эффекта диаметр канала должен в 15—20 раз превышать размер насадки. С целью предотвращения радиационного

теплообмена внутри теплоизоляции на внутренней стенке цилиндра *4* размещен электрический подогреватель *16*, с помощью которого температура внутренней стенки цилиндра поддерживалась равной температуре исследуемого объекта. Отсутствие перепада температур контролировалось дифференциальной термопарой и гальванометром М-196/Г. Степень нагревания стенки регулировалась путем изменения напряжения тока с помощью лабораторного автотрансформатора. Цилиндр *4* выполнял роль рабочей камеры и являлся основным элементом прибора.

Сущность метода исследования заключалась в определении потерь влаги сырьем при форсированных условиях тепло- и влагообмена, которые возникают в процессе охлаждения.

Для замера температуры применяли медь-константановые термопары и микрогальванометр М-95. В опыте замеряли температуру поверхности и среднеобъемную температуру одиночного объекта, а также температуру воздуха в непосредственной близости от него на расстоянии 20—25 *мм*. Влажность воздуха контролировалась с помощью психрометра, состоящего из сухой и мокрой термопар. Тарировку и проверку психрометра проводили в герметичных камерах, содержавших пересыщенные растворы солей хлористого натрия, хлористого калия и бромистого калия, равновесная влажность над которыми известна.

Другим методом контроля влажности воздуха служил расчетный метод: воздух, проходя слой дробленного льда, приобретал относительную влажность 100%, поэтому появлялась возможность достаточно точно определять влажность воздуха, омывающего исследуемый объект, по путевому подогреву его. Последний составлял 2—3° С. Относительная влажность воздуха колебалась в пределах от 80 до 87%, но в каждом отдельном опыте оставалась стабильной, так же как и температура набегающего потока воздуха, которая колебалась в процессе проведения экспериментальной работы в интервале от 2 до 3° С.

Исследуемые объекты до опыта хранились в холодильном шкафу при температуре 2° С, затем выдерживались в воздушном термостате модели 2Ц-450 в течение 10—12 *ч* при постоянной температуре, превышающей комнатную на 2—3° С. Для предотвращения увядания в период нагревания объекты располагались на сетке над поддонами с водой.

Целые объекты или их насыпь взвешивались непосредственно перед опытом и сразу же после охлаждения на технических весах первого класса с точностью $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ *кг*.

В помещении, где ставились опыты, замерялась температура и относительная влажность воздуха, по которым определялась соответствующая им точка росы. По ней устанавливалась температура конца охлаждения сырья. Обычно опыт прекращался, когда температура поверхности объектов не доходила до точки росы на 2—3° С.

Обработка опытных данных производилась с помощью уравнения (17), полученного на основании зависимости (15):

$$\varepsilon_F = \frac{\frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{\Delta t_л}{\Delta \omega_л}}{\frac{100}{n_0} c (t_н - t_{ко}) - r}, \qquad (17)$$

где $n_0$ — потеря влаги за период охлаждения, % к исходной массе сырья;
$C$ — удельная теплоемкость сырья, *дж/(кг · град)*;
$t_н$ — начальная температура сырья, °С;
$t_{ко}$ — конечная среднеобъемная температура сырья, °С.

Теоретическим расчетом [8, 69, 90, 92] и путем калориметрирования было установлено, что для замера среднеобъемной температуры спай термопары следует размещать на глубине 0,23 радиуса объекта шарообразной формы. Было использовано следующее расчетное уравнение безразмерной температуры сферического тела [96, 90, 92]:

$$\frac{t - t_c}{t_н - t_c} = \frac{A_1 \sin\left(\mu_1 \frac{R}{R_0}\right)}{\mu_1 \frac{R}{R_0} e^{\mu_1^2 \cdot F_0}}, \qquad (18)$$

где $t$ — температура концентрической сферы;
$R/R_0$ — относительный радиус сферы.

Коэффициенты $A_1$ и корни характеристического уравнения $\mu_1 = f(\mathrm{Bi})$ табулированы [90]. Расчет сводится к определению относительного радиуса сферы, температура которой совпадает со среднеобъемной. Оказалось, что этим условиям отвечает $R/R_0 = 0{,}77$. Сделанный вывод был подтвержден экспериментально путем калориметрирования яблок и столовой свеклы в конце охлаждения. Расчет проводился по уравнению теплового баланса. Отклонение от расчетного значения относительно радиуса концентрической сферы, имеющей температуру, совпадающую со среднеобъемной температурой, не превышало 4% (для яблок $R/R_0 = 0{,}8$, для столовой свеклы $R/R_0 = 0{,}76$).

Основным (контрольным) методом экспериментального исследования массообменных характеристик плодов и овощей было сопоставление потерь влаги исследуемыми объектами с кожурой и без кожуры. Для плодов и овощей, лишенных кожуры, $\varepsilon_F = 1$. Вторым методом было определение потерь охлаждаемых плодов и овощей с кожурой. Расчеты производились по уравнению (17), в котором принимали $\alpha/\beta = 1150$. По обоим методам получали сходные результаты.

Массообменные характеристики зависят от сортовых особенностей, продолжительности хранения и физического состояния

(степени зрелости при уборке, степени механического травмирования, поражения микроорганизмами, прорастания) сырья.

При исследовании картофеля, выращенного на подопытных участках Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени селекционно-генетического института (г. Одесса), получены следующие значение $\varepsilon_F$: сорт «Одесский-24» непосредственно после копки 0,11, через 5 суток 0,021, после 6 месяцев хранения с использованием естественного холода 0,012; сорт «Курьер» — 0,210, 0,037, 0,013; сорт «Сеянец 526» — 0,180, 0,029, 0,025 соответственно.

Эти опыты подтвердили значительное влияние на влаговыделение картофеля процесса суберинизации кожуры, который активно протекает в первые дни после копки, а также показали, что массообменные характеристики могут служить косвенным показателем лежкоспособности сырья. Чем ниже $\varepsilon_F$, тем более лежкоспособным является сорт. Это подтверждено также опытами с различными сортами винограда, представленными Украинским научно-исследовательским институтом виноградарства и виноделия им. Таирова. Связь между численными значениями массообменной характеристики сырья и его лежкоспособностью вполне закономерна, так как влаговыделения, приводящие к увяданию, снижают иммунитет живой растительной ткани к болезням.

А. А. Колесник подчеркивает, что плоды и овощи с высокой влагоудерживающей способностью обладали большой устойчивостью к микроорганизмам, и приходит к выводу: «Лежкие сорта обычно обладают более высокой влагоудерживающей способностью, чем нележкие» [80, стр. 41].

Установлено, что по мере созревания многих видов плодов и овощей массообменные характеристики уменьшаются. Смок [69] отмечает замедление испарения влаги у яблок по мере приближения сроков нормального сбора. А. А. Колесник [80] установил, обобщая многие работы, что недозрелые плоды и овощи увядают быстрее зрелых.

Интенсивность влаговыделения яблок снижается до наступления потребительской зрелости, но у перезревших плодов она снова увеличивается [207]. Леонард [202], Кидд и Вест [200] объясняют это явление тем, что при созревании плодов вследствие мацерации тканей и частичного заполнения межклетников соком происходит уменьшение объема межклетников.

Под руководством автора экспериментальное исследование массообменных характеристик плодов и овощей было выполнено инженером Л. В. Мартыновой. Опытами было охвачено около 40 видов сырья разных помологических сортов. В табл. 6 приводятся массообменные характеристики наиболее распространенных видов плодов и овощей.

Приведенные в табл. 6 данные следует рассматривать как приближенные. Они подлежат уточнению в зависимости от условий выращивания, сроков хранения и физического состояния плодов и овощей разных сортов.

Таблица 6

| Сырье | Время исследования | $\varepsilon_F$ |
|---|---|---|
| Яблоки летних сортов | Июль | 0,025—0,030 |
| Яблоки зимних сортов | Март | 0,011—0,014 |
| Груши | Август | 0,015—0,020 |
| Сливы | » | 0,020—0,025 |
| Персики | » | 0,210—0,270 |
| Абрикосы | Июль | 0,170—0,240 |
| Лимоны | Март | 0,060—0,080 |
| Мандарины | » | 0,110—0,140 |
| Виноград | Август | 0,070—0,100 |
| Вишня, черешня | Июль | 0,150—0,180 |
| Картофель | Март | 0,009—0,012 |
| Морковь | Июль | 0,350—0,400 |
| Свекла столовая | Март | 0,200—0,300 |
| Свекла сахарная суходольная | Октябрь | 0,250—0,300 |
| Свекла сахарная поливная | » | 0,350—0,450 |
| Лук репчатый | Март | 0,002—0,003 |
| Капуста белокочанная | Август | 0,370—0,450 |
| Зеленый горошек в стручках | Июнь | 0,700—0,800 |

Данные по массообменным характеристикам важнейших видов сырья позволяют оценить их относительную влагоудерживающую способность. Как показывает табл. 6, при одинаковом температурно-влажностном режиме в хранилище, т. е. при одинаковой разности концентраций водяного пара на границе сырье — воздух, влаговыделения на единицу поверхности у суходольной сахарной свеклы будут в 24 раза больше, чем у яблок зимних сортов. Этот вывод удовлетворительно согласуется с данными Раска [170], который считает, что свекла теряет в 30 раз больше воды, чем яблоки.

Из табл. 6 видно, что влагоудерживающая способность зеленого горошка ниже, чем картофеля в 65 раз.

По данным А. А. Колесника [80], яблоко без кожуры теряет влаги в 70 раз больше, чем с кожурой. Это соответствует массообменной характеристике $\varepsilon_F = 1/70 = 0{,}014$, что близко к полученной нами величине (0,010—0,014).

Покрытие зоны у плодоножки томатов парафином привело к уменьшению массообменной характеристики в 2,8 раза, что подтверждает важную роль этой зоны во влагообмене.

Уравнение (17) было использовано для косвенной проверки отношения Льюиса. Опыты ставились на картофеле, моркови, огурцах, яблоках, грушах, с которых предварительно снималась кожура для получения условий $\varepsilon_F = 1$. Замер влаговыделений при охлаждении указанных объектов в приборе (см. рис. 1) с последующими расчетами по уравнению (17) давал отклонения от теоретического значения $\alpha/\beta = 1150$ в пределах до 10%.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛАГООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СЫРЬЯ

Вскрытие закономерностей влагообмена продуктов с охлаждающим воздухом имеет теоретическое и практическое значение.

Полагали, что с увеличением перепада температур при охлаждении капусты потери веса возрастут. Опыт показал обратное [183].

Анализ процесса влагообмена охлаждаемых плодов и овощей с воздухом возможен с помощью уравнений (15) и (16).

Считаем заданными начальную и конечную среднеобъемные температуры сырья. При расчете параметра $M$ по уравнению (16) необходимо знать температуру поверхности охлаждаемых объектов. В начальный момент среднеобъемная температура и температура поверхности совпадают. Для установления связи между температурой поверхности $t_{кп}$ и среднеобъемной температурой $t_{ко}$ в конце процесса использовано уравнение (18). В нем принято $t = t_{ко}$ для $R/R_0 = 0{,}77$ и $t = t_{кп}$ для $R/R_0 = 1$. Получены следующие зависимости:

$$t_{кп} = t_c + (t_{ко} - t_c)\,\varepsilon_t\,, \tag{19}$$

$$\varepsilon_t = \frac{\sin \mu_1}{\sin (0{,}77\,\mu_1)}\,. \tag{20}$$

Расчеты, выполненные с помощью уравнений (15), (16), (19) и (20), показали, что перепад температур оказывает значительное влияние на потери влаги при охлаждении плодов (с 20 до 0° С): снижение температуры воздуха от —1 до —10° С уменьшает потери влаги приблизительно в 2 раза.

Снижение относительной влажности воздуха при температуре —10° С с 95 до 70% повысило влаговыделения продукта за период охлаждения всего на 10%, в то время как такое же снижение относительной влажности воздуха при температуре —1° С привело к увеличению усушки на 37%.

Установленное в рассмотренных примерах влияние перепада температур на влаговыделения пищевых продуктов за период охлаждения является закономерным и подтверждается опытными данными Купера [193].

В такой же мере закономерным следует считать вывод о том, что скорость воздуха при неизменном перепаде температур не должна оказывать влияния на общую потерю влаги за период

охлаждения. В уравнение (15) не входит ни одна величина, которая зависела бы от скорости воздуха. Физически эта закономерность понятна: с увеличением скорости воздуха возрастают влаговыделения в единицу времени, но в такой же мере увеличивается и отвод тепла, что влечет за собой сокращение продолжительности охлаждения. Этот теоретический вывод подтверждается опытными данными [193]: при охлаждении полутуш свинины скорость воздуха изменяли от 1 до 4 *м/сек,* что практически не отразилось на усушке мяса. При охлаждении полутуш с 40,5 до 4° С скорости воздуха 1 *м/сек* соответствовала усушка на 1,58%, а скорости 4 *м/сек* — на 1,55%.

Опхюз [205] установил, что увеличение удельного расхода вентилирующего воздуха в 2—3 раза не влияет на подсушивание картофеля.

Нами были выполнены расчеты, имевшие целью установить влияние начальной температуры сырья на потерю влаги за период охлаждения. Исходные данные: массообменная характеристика сырья $\varepsilon_F = 0{,}1$, конечная температура плодов 0° С, температура охлаждающего воздуха —1° С, относительная влажность воздуха 0,9, начальная температура в первом случае 20° С, во втором 10° С. Оказалось, что потеря влаги в первом случае составляет 0,42% к массе плодов, во втором — 0,17%, т. е. почти в 2,5 раза меньше.

Высокая начальная температура сырья служит одной из причин повышенных потерь в южных районах страны даже при эффективной теплоизоляции ограждений хранилища.

Характерной особенностью периода охлаждения является то, что размер плодов и овощей не оказывает практически никакого влияния на общую потерю влаги. Это объясняется медленным протеканием процесса охлаждения — малыми значениями критерия Био (малым градиентом температур внутри элементов сырья). При этих условиях контактная поверхность между сырьем и воздухом в равной мере влияет на отвод тепла и влаги.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛАГООБМЕНА ПРИ ХРАНЕНИИ СЫРЬЯ

Рассмотрим закономерности влагообмена при рекомендуемом [80] стабильном изотермическом режиме хранения сырья. Он соблюдается в гравитационной системе вентилирования сырья (см. гл. V).

Для выяснения закономерностей влагообмена при изотермическом режиме хранения проанализируем уравнение (15), введя в него предварительно тепло дыхания.

Дыхание — процесс окисления, главным образом углеводов. Интенсивность его, как всякой реакции, возрастает с увеличением температуры. Обозначим тепло дыхания (в ваттах на 1 *кг* сырья) через $q$. Руководствуясь общими закономерностями химических реакций, принимаем, что приращение тепла дыхания, приходящееся на 1° приращения температуры, пропорционально абсолют-

ному значению тепла дыхания при данной температуре. Математически это выражается дифференциальным уравнением

$$\frac{dq}{dt} = b\,q,$$

где $b$ — температурный коэффициент скорости дыхания.

После интегрирования получим

$$\ln q = b\,t + C',$$

где $C'$ — постоянная интегрирования. Находится из граничных условий:

$$t=0;\ q=q_0;\ C'=\ln q_0,$$

здесь $q_0$ — тепло дыхания при 0° С, *вт/кг*.

Таким образом, $\ln\frac{q}{q_0} = bt$ или окончательно

$$q = q_0 \exp(bt). \tag{21}$$

В приближенных расчетах коэффициент $b$ считают постоянной величиной. Как будет показано ниже, такое допущение является недостаточно обоснованным, так как нельзя не учитывать изменения $b$ с изменением температуры.

Уравнение (21) известно под названием уравнения Гора [195]. Оно проверялось и было подтверждено Грином [194].

Строго говоря, Гор установил зависимость от температуры не тепла дыхания, а интенсивности дыхания, косвенно оцениваемой количеством выделяемого углекислого газа. Имея в виду стехиометрические соотношения, вытекающие из балансового уравнения дыхания, уравнение (21) можно считать уравнением Гора.

И. Г. Алямовский [7] приводит в своей работе обобщенные данные по $q_0$ и $b$ 34 видов плодов и овощей. Эти данные, однако, нуждаются в уточнении, так как зависят от физического состояния и сроков хранения сырья. Хью и Смит [199] отмечают, например, что при одной и той же температуре плоды и овощи интенсивнее выделяют углекислоту и тепло непосредственно после уборки, чем несколькими днями позже.

Из уравнений (15) и (21) следует

$$W = \frac{q_0 \exp(bt)\,\tau}{\frac{\alpha}{\beta}\cdot\frac{1}{\varepsilon_F}M + r}, \tag{22}$$

где $W$ — влаговыделения, *кг* на 1 *кг* сырья;
$\tau$ — продолжительность хранения, *сек*.

Как видно из уравнения (22), зависимость влаговыделений сочного растительного сырья от температуры при хранении носит экспоненциальный характер.

Существенное влияние на влаговыделения оказывает фактор $M$. Из уравнения (16)

$$M = \frac{t - t_c}{\omega'' - \omega_c'' \varphi}, \qquad (23)$$

где $t$ — температура поверхности сырья, °С;

$t_c$ — температура охлаждающей воздушной среды, °С;

$\omega''$ и $\omega_c''$ — насыщающие концентрации водяного пара при температурах $t$ и $t_c$, $кг/м^3$;

$\varphi$ — относительная влажность воздуха в долях единицы.

Для интервала температур от —2 до +4° С (с погрешностью менее 1%)

$$10^3 \omega'' = 4{,}9 + 0{,}35\, t\,. \qquad (24)$$

Интервал температур, для которого справедливо уравнение (24), охватывает практически все температурные режимы хранения основных видов плодов и овощей.

На рис. 2 показана зависимость параметра $M$ от перепада температур и относительной влажности воздуха. Как видно из рисунка, с уменьшением перепада температур на границе сырье — воздух ниже 4—6° С параметр $M$, стоящий в знаменателе уравнения (22), вызывает тем большее увеличение влаговыделений, чем меньше массообменная характеристика и относительная влажность воздуха. Эта закономерность распространяется и на отвод физического тепла.

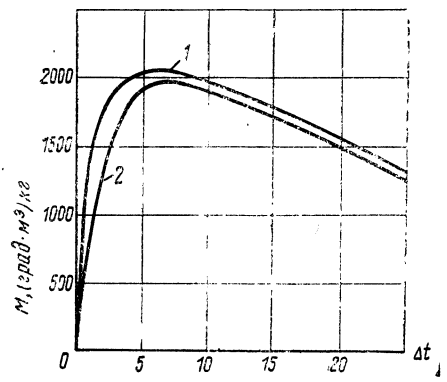



Рис. 2. Зависимость параметра $M$ от $\Delta t$:

*1* — $\varphi = 0{,}94$; *2* — $\varphi = 0{,}85$.

С целью выяснения действительных влаговыделений, автором при участии инженеров Л. В. Мартыновой, Ф. Е. Маллера и Б. П. Иващенко были проведены экспериментальные исследования в охлаждаемом картофелехранилище одесской торгово-закупочной базы «Торгмортранс».

Хранилище емкостью 700 *т*, оборудованное двумя ребристыми воздухоохладителями общей наружной поверхностью теплообмена 400 $м^2$.

Трубы воздухоохладителя внутренним диаметром 0,05 *м* имеют витые ребра высотой 0,03 *м* с шагом 0,032 *м*.

Центробежный вентилятор марки Ц4-70 № 8 приводится во вращение электродвигателем мощностью 5 *квт* и обеспечивает расход воздуха 23 000 $м^3/ч$, что соответствует удельному расходу $18{,}3 \cdot 10^{-6}$ $м^3/(кг \cdot сек)$, или 66 $м^3/(т \cdot ч)$.

Система охлаждения рассольная, средний перепад температур между воздухом и рассолом 5—7° С.

Способ хранения — контейнерный. Емкость контейнера 250 *кг*.
Высота хранилища 4,4 *м*, высота загрузки 3,5 *м*.
Разводка воздуха верхняя: воздух нагнетается вентилятором в воздуховоды, расположенные под потолком, и поступает в помещение через окна в воздуховодах. Забор воздуха осуществляется снизу за счет разряжения в камере воздухоохладителя (без воздуховодов). Имеется возможность добавки свежего воздуха в количестве 3—5%.

Методика исследования влаговыделений заключалась в непосредственном сборе влаги, выпадающей на рабочей поверхности воздухоохладителя в периоды, когда исключалась добавка свежего воздуха, а температура картофеля поддерживалась постоянной. Последняя замерялась термопарами, размещенными в 10 точках хранилища на высоте 2 *м* от пола. Стабильность ее (колебание не превышало 0,5° С) регулировалась за счет обеспечения соответствующего коэффициента рабочего времени воздухоохладителей и вентиляторов. Одно наблюдение длилось от 4 до 6 суток. Результаты наблюдений приводятся в табл. 7.

Таблица 7

| Показатель | Значения по периодам | | |
|---|---|---|---|
| | 15—20 ноября 1967 г. | 14—19 января 1968 г. | 20—26 апреля 1968 г. |
| Температура воздуха в хранилище, °С | | | |
| минимальная | 4,1 | 2,4 | 4,6 |
| максимальная | 4,9 | 2,8 | 5,0 |
| средняя | 4,5 | 2,6 | 4,8 |
| Относительная влажность воздуха (средняя), % | 82 | 90 | 87 |
| Температура наружного воздуха (средняя), °С | 7,0 | 0,5 | 6,0 |
| Удельные влаговыделения | | | |
| в *кг/(кг · сек)* | $33{,}9 \cdot 10^{-10}$ | $12{,}2 \cdot 10^{-10}$ | $36{,}4 \cdot 10^{-10}$ |
| в *г/(т · ч)* | 14,0 | 4,4 | 13,1 |

Закладка картофеля на хранение производилась в октябре. Воздухоохладители из-за недостатка холода в первый период работали с неполной нагрузкой. Понижение температуры до оптимальной (3—4° С) шло медленно и заняло около месяца. Картофель заготовлялся в колхозах Винницкой области и транспортировался по железной дороге. В связи со специфическими условиями заготовки, транспортировки и охлаждения клубки картофеля к моменту достижения нормального режима хранения теряли заметное количество влаги (до 4% к массе картофеля) и на ощупь в

большинстве случаев были частично увядшими. Преобладающий сорт — Лорх. В апреле началось прорастание картофеля.

Следует отметить ярко выраженную нестабильность влаговыделений картофеля по периодам хранения. Повышенное влаговыделение в первый период можно объяснить высоким коэффициентом рабочего времени вентиляторов (0,6—0,8 вместо 0,3—0,4 в январе), а также влиянием частичного механического травмирования клубней, имевшим место при перевозке и загрузке картофеля в хранилище. Рост влаговыделений в апреле объясняется начавшимся прорастанием клубней.

Проведенные лабораторные опыты подтвердили необходимость исследования массообменных характеристик картофеля и других видов сырья по фазам хранения.

Для примера можно привести следующие средние значения массообменных характеристик картофеля сорта Одесский-24, полученные автором совместно с Л. В. Мартыновой: непосредственно после уборки — 0,105, через 5 суток после уборки — 0,021, в основной период хранения (ноябрь—февраль) — 0,012. Эти данные отражают влияние процесса суберинизации на влаговыделения картофеля.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЛАГОВЫДЕЛЕНИЙ ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ И ХРАНЕНИИ

Расчет влаговыделений является одним из наиболее трудных вопросов проектирования хранилищ и охлаждающих систем. В настоящее время влаговыделения не учитываются или принимаются без достаточных обоснований.

Бузингер [190] в качестве упрощающей предпосылки при разработке методики расчета интенсивности вентилирования и продолжительности охлаждения сыпучих материалов принял неизменность влагосодержания вентилирующего воздуха, что для плодов и овощей, выделяющих влагу, влечет за собой погрешность в 50—80%. В. Н. Фелонин пишет: «При расчете общего воздухообмена и производительности вентиляционных систем следует принимать, что 1 *т* картофеля при оптимальной температуре выделяет 19 *г* водяных паров» [166, стр. 18]. Это в 4,3 раза превышает полученную нами экспериментально величину (табл. 7) и в 2,4 раза расчетную величину влаговыделений, приводимую Г. Л. Басиным [17].

Методика расчета влаговыделений, использованная Г. Л. Басиным, заключается в следующем. За основу приняты нормы естественной убыли овощей, утвержденные для холодной зоны Министерством торговли СССР в 1957 г., причем сделано допущение, что на долю влаговыделений из убыли массы приходится: для капусты 83%, для остальных овощей 80%, для картофеля в среднем около 70%.

Такой подход к расчету влаговыделений не может дать достоверных результатов, так как не учитывается влажность воздуха

и другие физические факторы, влияющие на влагообмен. Принимать постоянной долю влаги в естественной убыли нельзя. Например, по данным Н. А. Жоровина [62], она колеблется для картофеля в пределах от 20 до 85%.

Влаговыделения за период охлаждения могут быть рассчитаны с помощью уравнения (15), которое удобно в данном случае представить в следующем виде:

$$n_0 = \frac{0{,}87\, c\,(t_н - t_{ко})\,\varepsilon_д}{2170 + \frac{1}{\varepsilon_F} M}, \qquad (25)$$

где $n_o$ — влаговыделения за период охлаждения, % к массе сырья;
$c$ — теплоемкость сырья, *дж/(кг · град)*;
$t_н$ — начальная температура сырья, °С;
$t_{ко}$ — конечная среднеобъемная температура сырья, °С;
$\varepsilon_д$ — коэффициент, учитывающий тепло дыхания, выделяемое за период охлаждения $\varepsilon_д = 1 + \frac{q_{общ}}{c\,(t_н - t_{ко})}$; здесь $q_{общ}$ — тепло дыхания, *дж/кг*.
Вычисляется по формуле автора [59]:

$$q_{общ} = \frac{1{,}03 - 0{,}074\, b\,(t_1 - t_2)\; q_0\,(e^{bt_1} - e^{bt_2})\;\tau}{b(t_1 - t_2)},$$

$t_1$ и $t_2$ — начальная и конечная температура сырья, °С;
$\tau$ — продолжительность процесса охлаждения, *сек*;
$M$ — параметр, рассчитываемый по уравнению (16).

Как показано на рис. 3, при температуре плодов $t = t_A$ в период хранения возможны три равновесных состояния воздуха с температурой $t_c$: 1) в точке $B$: $t_c > t$; $\varphi = \varphi_B$; 2) в точке $C$: $t_c = t$, $\varphi_C > \varphi_B$; 3) в точке $D$: $t_c < t$, $\varphi_D = 1{,}0$.

Первое равновесное состояние возникает при низкой относительной влажности воздуха, когда вследствие интенсивного испарения влаги температура сырья оказывается ниже температуры воздуха. Этот случай — наиболее неблагоприятный в отношении влаговыделений, так как испарительным охлаждением отводится не только тепло дыхания, но и тепло, поступающее к сырью от воздуха за счет разности температур; подробно он рассматривается ниже и иллюстрируется опытными данными Н. Ф. Шепс [181].

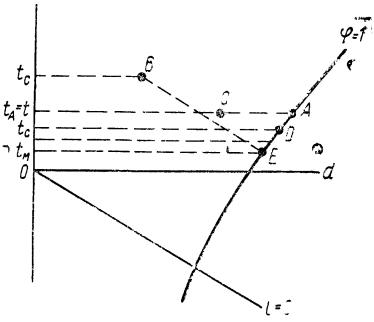



Рис. 3. Равновесная температура сырья и воздуха:
$A$ — состояние воздуха в пограничном слое с сырьем; $B$, $C$, $D$ — равновесные состояния воздуха при различной относительной влажности; $E$ — состояние воздуха в пограничном слое с шариком мокрого термометра.

Третий случай оптимальный: относительная влажность воздуха равна 100%, но влага теряется, хотя и в минимальном количестве.

Равновесная температура воздуха ниже температуры плода, так как он представляет собой тело с внутренним источником тепла. По этой же причине равновесная температура плода всегда выше температуры воздуха по мокрому термометру $t_м$ в отличие от влажного тела без внутреннего источника тепла (например, мяса), для которого обычно принимают $t=t_м$. Третье равновесное состояние возникает в плодоовощехранилищах при высокой (оптимальной) относительной влажности воздуха. Разработанный автором метод расчета влаговыделений, базирующийся на использовании уравнений (22)—(24), относится к третьему равновесному состоянию, как наиболее благоприятному, которое должно обеспечиваться техникой хранения.

Во втором случае, когда равновесная температура плода равна температуре воздуха, параметр $M=0$. Уравнение (22) приобретает в этом случае вид

$$W = \frac{q_0 \exp(bt)\,\tau}{r};$$

потеря влаги (в процентах к массе сырья) вычисляется по формуле

$$n_{хк} = 4 \cdot 10^{-5} q_0 \exp(bt)\,\tau. \qquad (26)$$

Как видно из уравнения (26), тепло дыхания при этих условиях отводится только путем испарительного охлаждения и влаговыделения не зависят от влагоудерживающей способности сырья $1/\varepsilon_F$. Последнее объясняется тем, что равенство температуры сырья и воздуха возможно только в том случае, когда соответствующая относительная влажность воздуха обеспечивает за счет испарения влаги отвод тепла дыхания при любых значениях $\varepsilon_F$. Чем ниже $\varepsilon_F$, тем ниже должно быть $\varphi$. В противном случае второе равновесное состояние нарушится.

Выясним, при какой относительной влажности воздуха отвод тепла дыхания будет происходить только путем испарительного охлаждения. Запишем уравнение теплового баланса при $t=t_c$:

$$q_0 \exp(bt) = \beta F \varepsilon_F (\omega'' - \omega''\varphi_к)\, r,$$

$$1 - \varphi_к = \frac{q_0 \exp(bt)}{\beta F \varepsilon_F \omega'' r},$$

$$\omega'' = (4{,}9 + 0{,}35\,t) \cdot 10^{-3}; \quad r = 2{,}5 \cdot 10^6.$$

После преобразований получим

$$1 - \varphi_к = \frac{1{,}32\, q_0 \exp(bt)}{\alpha F \varepsilon_F (14 + t)}. \qquad (27)$$

Дефицит влажности $1-\varphi_к$, при котором отвод тепла дыхания осуществляется только путем испарительного охлаждения, назовем критическим. Он будет тем меньшим, чем выше массообменная характеристика сырья (ниже — влагоудерживающая способность), чем больше скорость воздуха, влияющая на коэффициент теплоотдачи, чем мельче отдельные элементы сырья и чем меньше энергия дыхания.

В табл. 8 приводятся результаты расчета критической влажности воздуха для яблок и моркови, отвечающей отводу тепла дыхания только путем испарительного охлаждения. Тепло дыхания принято по данным И. Г. Алямовского [7].

Таблица 8

| Показатель | Символ | Яблоки | Морковь |
|---|---|---|---|
| Температура, °С . . . . . | $t=t_c$ | 0 | 0 |
| Тепло дыхания, *вт/кг* . . . . . | $q_0$ | 0,0121 | 0,01349 |
| Коэффициент теплоотдачи, *вт/(м²·град)* | $\alpha$ | 4 | 4 |
| Удельная поверхность, *м²/кг* . . . . | $F$ | 0,14 | 0,19 |
| Массообменная характеристика . . . | $\varepsilon_F$ | 0,012 | 0,350 |
| Критическая относительная влажность воздуха, % . . . . . | $\varphi_к$ | 88,4 | 99,5 |

Как видно из табл. 8, для моркови при 0° С отводу тепла только путем испарительного охлаждения соответствует относительная влажность воздуха 99,5%; для яблок эти условия возникают при более низкой влажности воздуха — 88,4%. Отсюда следует важный в практическом отношении вывод: равновесная температура плодов и овощей со слабой влагоудерживающей способностью ($\varepsilon_F > 0{,}2$) при относительной влажности воздуха ниже 90% и температуре 0° оказывается ниже температуры воздуха. При этих условиях путем испарительного охлаждения отводится не только тепло дыхания, но также тепло, которое подводится к сырью за счет разности температур, т. е. создаются крайне неблагоприятные условия — резко возрастают влаговыделения, сырье теряет тургор, что служит главной причиной возникновения микробиологических процессов и повышенных потерь.

Из табл. 8 видно, что в опытах А. П. Рубанюка [129] по исследованию влагоудерживающей способности яблок создавались нетипичные для этого вида плодов условия: температура плодов, находившихся в абсолютно сухом воздухе, была ниже температуры воздуха.

Рассмотрим случай, когда точка состояния воздуха в $d$—$i$-диаграмме занимает промежуточное место между точками $C$ и $D$.

Для расчета используется уравнение (22), которое удобно представить в следующем виде:

$$n_x = \frac{0{,}087\, q_0 \exp(bt)\, \tau}{2170 + \frac{1}{\varepsilon_F} M}, \qquad (28)$$

где $n_x$ — потеря влаги, % к массе сырья.

Для расчета параметра $M$ по уравнению (23) необходимо найти равновесную температуру сырья. Запишем уравнение теплового потока от сырья к воздуху:

$$q_0 \exp(bt) = \alpha F (t - t_c) + \beta F \varepsilon_F (\omega'' - \omega_c'' \varphi) r .$$

Решая это уравнение совместно с уравнением (24), находим следующую формулу для расчета равновесной температуры сырья.

$$t = \frac{\frac{q_0 \exp(bt)}{\alpha F} + t_c - 10{,}6\, \varepsilon_F (1 - 200\, \omega_c'' \varphi)}{1 + 0{,}76\, \varepsilon_F}. \qquad (29)$$

Уравнение (29) справедливо для интервала температур от —2 до +4° С. Использование уравнения (29) возможно при условии хотя бы приближенного обоснования скорости воздуха в насыпи сырья, коэффициента теплоотдачи и величины контактной поверхности на границе сырье—воздух. Скорость воздуха в насыпи сырья колеблется в широких пределах — от 0,01 до 0,15 *м/сек*.

При активном вентилировании обычно известными являются удельные расходы воздуха. Обозначив через $V$ удельный расход воздуха в $м^3/(кг \cdot сек)$ и высоту слоя сырья через $h$, получим расход воздуха на 1 $м^2$ площади пола (площади основания штабеля или насыпи сырья) $Vh\rho_н$ $м^3/сек$. Среднее живое сечение для прохода воздуха находится путем деления незаполненного объема (объема воздуха) в насыпи на высоту слоя сырья, т. е.

$$f_ж = \frac{h - \frac{h \rho_н}{\rho_ф}}{h} = 1 - \frac{\rho_н}{\rho_ф}.$$

Средняя скорость воздуха в слое сырья находится из уравнения сплошности движения. С учетом наличия механических загрязнений расчетная формула имеет вид:

$$w = \frac{V h \rho_н}{\left(1 - \frac{\rho_н}{\rho_ф}\right) \varepsilon_з'}, \qquad (30)$$

где $w$ — скорость воздуха, *м/сек;*
$\rho_н$ — насыпная плотность сырья, *кг/м*$^3$;
$\rho_ф$ — физическая плотность сырья, *кг/м*$^3$;
$\varepsilon_з'$ — коэффициент, учитывающий наличие посторонних механических загрязнений [$\varepsilon_з' < 1$ (обычно $\varepsilon_з' = 0{,}85 \div 0{,}95$)].

Расчетные значения скорости воздуха в свекловичных кагатах ($\rho_н = 650$, $\rho_ф = 1085$, $\varepsilon'_з = 0{,}9$) при удельных расходах 25—40 *м*$^3$*/(т·ч)* полностью совпадают с данными В. Г. Садковского [170]. В. Г. Садковский [144] указывает, что скорость воздуха в кагатах колеблется в пределах от 0,03 до 0,08 *м/сек.*

Формула (30) отражает одну неприятную особенность активного вентилирования сырья при изотермическом режиме и непрерывной работе вентиляторов: стремление увеличить степень использования емкости хранилища за счет увеличения высоты слоя сырья приводит, как видно из уравнения (30), к увеличению скорости движения воздуха, что влечет за собой увеличение коэффициента теплоотдачи и уменьшение перепада температур между сырьем и воздухом. В свою очередь, это приводит, как видно из рис. 2, к уменьшению параметра $M$ и увеличению влаговыделений сырья, так как параметр $M$ входит в знаменатель уравнения (28).

Обобщение ряда работ [25, 75, 88, 151, 159, 175] позволило рекомендовать критериальное уравнение

$$\mathrm{Nu} = 2 + 0{,}16\,\mathrm{Re}^{0{,}67}.$$

Это уравнение было получено П. С. Клячко [75] для $\mathrm{Re} = 0 \div 2000$. Оно экспериментально проверено в интервале $\mathrm{Re} = 0{,}7 \div 200$ и подтверждено А. Н. Сокольским [151].

С учетом условий при охлаждении и хранении плодов и овощей уравнение П. С. Клячко может быть представлено в следующем виде:

$$\alpha = \frac{0{,}05}{d_c} + 7{,}27\,\frac{w^{0{,}67}}{d_c^{0{,}33}}, \qquad (31)$$

где $d_c$ — средний размер (диаметр) плода, *м*;
$w$ — скорость воздуха, *м/сек.*

По данным Б. Н. Китаева [74], при нестационарном тепловом режиме (охлаждение, нагревание) для крупных частиц необходимо вводить поправочный коэффициент. Для частиц шарообразной формы вместо $\alpha$ в уравнение теплообмена следует подставлять:

$$\alpha_ф = \alpha\,(1 + 0{,}2\,\mathrm{Bi}).$$

Максимальное значение критерия Bi при обычных условиях охлаждения плодов и овощей не превышает 0,5, т. е. поправочный коэффициент менее 1,1.

Точное определение площади контактной поверхности с воздухом затруднено.

И. М. Федоров [164] рекомендует вычислять ее как суммарную площадь шарообразных частиц со средним эквивалентным диаметром $d_э$, который представляет собой диаметр равновеликого по объему шара. По опытам И. М. Федорова обычно

$$d_э \approx 0{,}75\, d_{ср},$$

где $d_{ср}$ — среднеарифметическая величина из размеров отверстий сит, через которые проходят частицы (приблизительно средний размер частиц).

Применение указанного соотношения для плодов и овощей требует проверки, однако приводимый ниже расчет поверхности картофеля показывает, что оно дает удовлетворительные результаты. Суммарная площадь поверхности 1 *кг* плодов как тел сферической формы с эквивалентным диаметром $d_э$ выражается уравнением

$$F = \frac{6}{d_э \rho_ф}. \qquad (32)$$

По данным Б. Опхюза [118], удельная поверхность 1 $м^3$ насыпи картофеля средним диаметром 40 *мм* составляет 120 $м^2$, насыпная плотность $\rho_н = 636$ *кг*/$м^3$. Поверхность, приходящаяся на 1 *кг*, 0,189 $м^2$. При $\rho_ф = 1085$ *кг*/$м^3$ по уравнению (32) $F = 0{,}185$ $м^2$, что почти полностью совпадает с данными Б. Опхюза.

Для сахарной свеклы и моркови нами получена эмпирическая формула

$$F = \frac{8}{d_с \rho_ф}, \qquad (32\,а)$$

где $d_с$ — средний размер в наиболее толстой части корнеплода.

Возвратимся к анализу уравнения (29). При типичных для хранения моркови условиях $\alpha = 3{,}5$ *вт*/($м^2 \cdot$ *град*), $F = 0{,}19$ $м^2$, $\varepsilon_F = 0{,}35$, $q_0 = 0{,}0135$ *вт*/*кг* [7]. Определим равновесную температуру моркови при $\varphi = 0{,}95$ и $t_с = 0°$ С.

По уравнению (29) $t = -0{,}2°$ С, т. е. даже при такой высокой влажности воздуха, как 95%, сырье со слабой влагоудерживающей способностью имеет температуру ниже температуры воздуха. Приток тепла от воздуха к сырью в рассмотренном случае составляет 0,13 *вт*/*кг*, что почти в 10 раз превышает тепло дыхания. При относительной влажности воздуха 85% и температуре его 0° С равновесная температура моркови будет равна —0,5° С, теплоприток к сырью от воздуха превысит тепло дыхания почти в 25 раз. Это показывает, насколько опасна пониженная влажность воздуха для сырья со слабой влагоудерживающей способностью.

Формула (28) пригодна для условий, когда равновесная температура сырья выше температуры воздуха. Поэтому, прежде чем пользоваться ею, необходимо выполнить расчет по формуле (29) или (27).

Если равновесная температура сырья ниже температуры воздуха, уравнение теплового баланса приобретает вид

$$q_0 \exp(bt) + \alpha (t_c - t) = \beta F \varepsilon_F (\omega'' - \omega_c'' \varphi) r,$$

уравнение влажностного потока — вид

$$W = \beta F \varepsilon_F (\omega'' - \omega_c'' \varphi).$$

На основании этих уравнений находим следующую формулу для расчета влаговыделений при равновесной температуре сырья ниже температуры воздуха

$$n_x' = 4 \cdot 10^{-5} [q_0 \exp(bt) + \alpha F (t_c - t)] \tau, \qquad (33)$$

из которого видно, что в этом случае испарительное охлаждение является единственным средством отвода теплопритоков к сырью и тепла дыхания.

Н. Ф. Шепс [181] сообщает, что в одном из опытов хранения моркови россыпью в холодильнике при температуре 0° С и относительной влажности воздуха 70% убыль массы составила 21,8% за 7 суток.

В табл. 9 приводятся результаты расчетов в сопоставлении с данными Н. Ф. Шепс.

Таблица 9

| Показатель | Символ | Номер формулы | Численное значение |
|---|---|---|---|
| Температура воздуха, °С | $t_c$ | — | 0 |
| Относительная влажность воздуха | $\varphi$ | — | 0,7 |
| Тепло дыхания, *вт/кг* | $q_0$ | — | 0,0135 |
| Массообменная характеристика | $\varepsilon_F$ | — | 0,35 |
| Продолжительность хранения, сутки | $\tau_c$ | — | 7 |
| Коэффициент теплоотдачи, *вт/(м²·град)* | $\alpha$ | 31 | 3,5 |
| Удельная поверхность, *м²/кг* | $F$ | 32 | 0,19 |
| Равновесная температура сырья, °С | $t$ | 29 | —1,15 |
| Влаговыделения, % | $n_x$ | 33 | 18,8 |
| Естественная убыль, % | $n'_x$ | — | 21,8 |

Как видно из таблицы, результаты расчета хорошо согласуются с опытными данными Н. Ф. Шепс.

При изотермическом режиме хранения потери влаги составили бы, как показывает расчет по уравнению (26), только 0,33%. Эти условия возможны при критической влажности воздуха 99,5%. Таким образом, снижение относительной влажности воздуха с 99,5 до 70% увеличивает влаговыделения моркови при 0° С в 54 раза. Теплоприток к сырью от воздуха при этих условиях в 57 раз больше тепла дыхания. Рассмотренный пример показывает, какое большое значение имеет высокая влажность воздуха для сырья со слабой влагоудерживающей способностью.

Значительно меньшее влияние на потери оказывает влажность воздуха в период охлаждения сырья. Как показывают расчеты, при $t_c = -1°$ С и относительной влажности воздуха 95% охлаждение моркови от 15 до 0° С сопровождается потерей влаги в количестве 0,7% к массе сырья.

## НИЖНИЙ ПРЕДЕЛ ВЛАГОВЫДЕЛЕНИЙ ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ ПРИ ХОЛОДИЛЬНОМ ХРАНЕНИИ

Б. Опхюз [118] подчеркивает, что относительная влажность воздуха 100% не приостанавливает процесса испарения влаги при активном вентилировании. Это согласуется с изложенными выше представлениями о механизме влагообмена сырья с воздухом. Решая совместно уравнения (23), (24) и (28), получим для случая $\varphi = 1$

$$n'_{x_{min}} = \frac{4 \cdot 10^{-5} q_0 \exp(bt)\tau}{1 + 1{,}31 \dfrac{1}{\varepsilon_F}}, \qquad (34)$$

где $n'_{x_{min}}$ — минимальное количество испаряющейся влаги, % к массе сырья.

С учетом влаги как продукта дыхания можно преобразовать уравнение (34) следующим образом:

$$n_{x_{min}} = 0{,}38 \cdot 10^{-5} \left(1 + \frac{10{,}5}{1 + 1{,}31 \dfrac{1}{\varepsilon_F}}\right) q_0 \exp(b\,t)\,\tau. \qquad (35)$$

Сопоставление результатов расчетов по уравнениям (34) и (35) показывает, что при относительной влажности воздуха 100% на долю физической влаги для сырья со слабой влагоудерживающей способностью ($\varepsilon_F > 0{,}2$) приходится 50—70%, для сырья с высокой влагоудерживающей способностью ($\varepsilon_F < 0{,}05$) — менее 25%, причем общие потери влаги уменьшаются в 2—3 раза.

Потери влаги в воздух, насыщенный водяными парами при $t_c = 0°$ С и $\varepsilon_F = 0{,}35$, составляют за 150 суток, как показывает расчет по уравнению (34), 1,4% массы сырья. Общая величина мини-

мальных влаговыделений моркови при 0° С и относительной влажности воздуха 100% за указанный период по уравнению (35) будет 2,1%. По данным Г. Л. Басина [17], полученным на основании анализа норм естественной убыли и потерь сухих веществ на дыхание, влаговыделения моркови в январе, когда равновесная влажность воздуха наиболее высокая (но несколько ниже 100%), составляют 7,2 *г/(т·ч)* или, в пересчете на 150 суток, 2,6%.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЕСТЕСТВЕННОЙ УБЫЛИ МАССЫ ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ

Влаговыделения составляют значительную часть естественной убыли массы сырья при охлаждении и хранении. Полученные выше зависимости с учетом потерь сухих веществ на дыхание могут быть использованы при анализе причин потерь, разработке эффективных способов хранения и обосновании норм убыли сырья. А. П. Рубанюк пишет: «Начиная с 1919 г. в нашей стране периодически производится изучение размеров естественной убыли различных товаров, в том числе свежих плодов и овощей... Почти сорокалетний опыт исследований показал, что метод опытных наблюдений имеет существенные недостатки. К ним относятся, прежде всего, длительность, громоздкость и дороговизна проводимых исследований: чтобы полученные данные могли быть использованы при установлении норм естественной убыли, необходимо проводить такие опыты, как минимум, в течение двух лет в районах с различными климатическими условиями, в хранилищах разных типов и т. п.» [128, стр. 80].

Обобщение опытных данных, как правило, невозможно, так как авторы исследований часто не учитывают важнейших факторов, влияющих на естественную убыль сырья.

Излагаемый ниже вывод аналитических зависимостей, отражающих закономерности естественной убыли плодов и овощей, базируется на следующих исходных положениях:

1. Отвод физического и физиологического тепла осуществляется воздухом, пронизывающим насыпь сырья. При хранении плодов и овощей система воздушного охлаждения обязательна [97, 203].

2. Интенсивность вентилирования насыпи сырья определяется при охлаждении технологически заданной скоростью отвода физического тепла, при хранении интенсивностью выделения и отвода физиологического тепла. Вентилирование сырья, не сопровождающееся отводом тепла, вредно и в расчет не принимается.

3. Естественная убыль плодов и овощей определяется потерей сухих веществ в количестве, эквивалентном теплу дыхания, и испарением влаги, неизбежным при отводе тепла дыхания воздухом.

Активное вентилирование сырья атмосферным воздухом получило большое распространение, но в связи с малым коэффициентом рабочего времени в первый период после закладки сырья на

хранение охлаждение его производится медленно: в картофелехранилищах, например, от 2 до 4 недель. При этих условиях к подлежащему отводу физическому теплу необходимо добавить физиологическое тепло, которое учитывается поправочным коэффициентом.

Расчет количества влаги, выделяемой за период охлаждения, ведется по формуле (25).

При нормальном режиме хранения, когда температура сырья выше температуры воздуха, влаговыделения за период хранения вычисляются по уравнению (28).

Для учета потерь сухих веществ на дыхание удобно воспользоваться обобщенными данными И. Г. Алямовского [7] по энергии дыхания.

При правильно организованном хранении плодов и овощей, когда вентилирование осуществляется только с целью отвода тепла дыхания, потери сухих веществ определяются величиной энергии дыхания.

Для подавляющего большинства плодов и овощей процесс дыхания описывается следующим суммарным балансовым уравнением [61, 134] (молекулярные массы выражены в *кг*):

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O + 2{,}82 \cdot 10^9 \text{ дж}. \qquad (36)$$

Приведенное уравнение является удовлетворительным выражением сложных превращений веществ и энергии в том случае, когда окисляемыми веществами являются углеводы (сахара). Критерием справедливости его приложения служит дыхательный коэффициент [61], представляющий собой отношение объема выделяемого углекислого газа к объему расходуемого на окисление кислорода. Теоретическое значение этого коэффициента равно 1. В действительности, за исключением цитрусовых плодов, на дыхание которых расходуются и кислоты, дыхательный коэффициент плодов и овощей близок к 1 [61, 134].

Смок, суммировавший работы по изучению тепловыделений плодов и овощей, показал, что при сравнении калориметрических данных с результатами, найденными прямым подсчетом тепла по количеству выделенной углекислоты, получаются довольно сходные данные: расхождение не превышает 10% [81].

Согласно уравнению (36), на 1 *дж* тепла дыхания выделяется $9{,}4 \cdot 10^{-8}$ *кг* углекислого газа. По данным И. Г. Алямовского [7], указанная величина составляет $(9{,}8 \div 10{,}4) \cdot 10^{-8}$ *кг/дж* (расхождение до 11%).

А. И. Опарин, Н. И. Дьячков и И. В. Глазунов провели лабораторные работы по хранению свекловичных корней в стерильных условиях при строго постоянной температуре, влажности и аэрации в течение 103 суток, причем было установлено, что «количество выдыхаемой корнем углекислоты находится в соответствии с общими потерями углерода в корне; следовательно, хранящийся

корень не выделяет никаких других газообразных продуктов, кроме углекислоты» [170, стр. 82].

По данным М. З. Хелемского [170], начиная со второго дня после копки дыхательный коэффициент свеклы колеблется в пределах от 1,00 до 1,05, приближаясь в большинстве случаев к 1. А. А. Колесник [80] отмечает, что материалом для дыхания плодов и овощей служат в первую очередь углеводы.

Интенсивность дыхания и определяемые ею потери иногда связывают с относительной влажностью воздуха. По-видимому, прямой связи здесь нет, а наблюдавшиеся зависимости оказывались следствием вторичного явления — микробиологических процессов, которые возникали при неблагоприятном влажностном режиме. В частности, увядание ткани при низкой влажности воздуха не влияет на уровень дыхания до тех пор, пока не начнутся гнилостные процессы. Б. А. Рубин пишет: «Оказалось, что интенсивность дыхания свекловичных корней в условиях постепенного подсушивания в течение 94 суток, при суммарной потере веса в размере около 6% первоначального веса, остается без перемен и соответствует дыханию при полном насыщении атмосферы водяным паром» [131, стр. 318].

Эту же мысль о достаточной стабильности потерь за счет дыхания подчеркивает также Н. А. Жоровин: «Исследование естественной убыли при хранении шести сортов картофеля показало, что они заметно различаются размерами потерь влаги, общей убылью в весе и в меньшей степени — величиной потерь органических веществ в процессе дыхания» [62, стр. 10]. Это обстоятельство указывает на возможность косвенной оценки лежкоспособности сырья различных помологических сортов по их массообменным характеристикам.

Гексозы могут стать продуктами окисления в завершающей фазе химических превращений, что типично, например, для картофеля [17]; сам процесс окисления гексоз достаточно сложен и протекает, по теории В. И. Палладина, в две стадии [164], однако, как отмечает В. Н. Жолкевич, «возможные изменения химизма дыхания на промежуточных этапах не имеют значения, так как, согласно закону Гесса, количество освобождаемой при этом энергии зависит только от начального и конечного состояний системы, но не зависит от пути, по которому протекает реакция» [61, стр. 408].

Рассчитанные по уравнению (36) и опытные величины тепла дыхания, найденные путем калориметрирования, почти совпадают для закончивших рост растений [61].

На основании зависимости (36) естественная убыль плодов и овощей при хранении, обусловленная расходованием сухих веществ на дыхание, может быть выражена с достаточной точностью уравнением

$$n_q = 0{,}64 \cdot 10^{-5} q_0 \exp(bt)\tau. \qquad (37)$$

Общая естественная убыль состоит из потерь влаги и сухих веществ

$$n = n_0 + n_x + n_q ; \qquad (38$$

$n_x$ вычисляется по формуле (28).

При нормировании естественной убыли плодов и овощей следует исходить из минимальной величины потерь (при $\varphi = 100\%$), а затем устанавливать поправочные коэффициенты в зависимости от равновесной влажности воздуха, типичной для отдельных промышленных способов хранения в различных климатических зонах. В этом случае расчет предельно упрощается. Можно пользоваться уравнением

$$n_{min} = n_{o_{min}} + n'_{x_{min}} + n_q; \qquad (39)$$

$n'_{x\,min}$ вычисляется по формуле (34).

Табл. 10 представляет собой пример обоснования минимальной естественной убыли сырья (в данном случае моркови) за период охлаждения и хранения.

Таблица 10

| Показатель | Символ | Номер формулы | Численные значения |
|---|---|---|---|
| Начальная температура, °С . . . . | $t_н$ | — | 15 |
| Коэффициент теплоотдачи, *вт/(м²·град)* | $\alpha$ | 31 | 5 |
| Тепло дыхания при 0°С, *вт/кг* . . . | $q_o$ | — | 0,0135 |
| Продолжительность хранения, сутки . . | $\tau_c$ | — | 120 |
| Диаметр корня (моркови), *м* . . . | $d$ | — | 0,03 |
| Температура воздуха, °С . . . . | $t_c$ | — | −1,0 |
| Коэффициент теплопроводности сырья, *вт/(м · град)* . . . . . | $\lambda$ | — | 0,65 |
| Удельная теплоемкость сырья, *дж/(кг · град)* . . . . . | $c$ | 1 | 3900 |
| Массообменная характеристика сырья | $\varepsilon_F$ | — | 0,35 |
| Критерий Bi . . . . . | Bi | — | 0,12 |
| Конечная температура поверхности сырья, °С . . . . . | $t_{кп}$ | 20 | −0,03 |
| Потери влаги при хранении, % . . . | $n'_{x\,min}$ | 34 | 1,19 |
| Потери влаги при охлаждении, % . . | $n_{o\,min}$ | 25 | 0,58 |
| Потери на дыхание, % . . . . . | $n_q$ | 37 | 0,91 |
| Общие минимальные потери, % . . . | $n_{min}$ | 39 | 2,68 |

Следует отметить, что относительная влажность воздуха в период охлаждения незначительно отражается на общих потерях. Расчет показывает, что при снижении ее в период охлаждения до 90% и прочих равных условиях (при хранении $\varphi=1$) общие потери возрастут с 2,68 до 2,87%, т. е. незначительно. В приближенных расчетах можно принимать температуру поверхности сырья равной среднеобъемной (т. е. $\varepsilon_t=1$).

Массообменная характеристика сырья влияет не только на абсолютную величину потерь, но также и на соотношение компонентов потерь. В приведенном примере более половины (57%) общих потерь при хранении приходится на влагообмен. Как показывает расчет, для яблок при $\varepsilon_F=0{,}02$ и $q_0=12{,}1$ *вт/т* [7] общие минимальные потери за 120 суток составят 0,9% (вместо 2,1% для моркови), причем на долю сухих веществ при $\varphi=1$ будет приходиться 90% общих потерь.

По данным П. Ф. Сокола [150], нормы естественной убыли моркови в декабре и январе для УССР составляют 0,8% в месяц. В указанное время года равновесная влажность воздуха в массе сырья приближается к 98—100%, а температура поддерживается около 0° С. Из расчета на 4 месяца хранения естественная убыль составила бы 3,2%. По результатам нашего расчета (табл. 10) минимальная убыль за указанное время составляет 2,68%.

Предложенная методика расчета может быть использована при нормировании потерь сырья, для чего необходимо в расчетные формулы вводить поправочные коэффициенты (1,2—1,5).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Механизм влагообмена плодов и овощей с воздухом имеет специфические особенности: испарение влаги происходит в основном не с поверхности кожуры, а внутри межклетников, система которых сообщается с атмосферой через своеобразные «кратеры» (чечевички, устьица).

2. Кожура, в состав которой входит воскоподобное вещество кутин, играет важную защитную роль в процессах влагообмена плодов и овощей с воздухом. Так, например, яблоки без кожуры теряют в 60—80 раз больше влаги, чем при наличии кожуры.

Для оценки защитной роли кожуры плодов и овощей в уравнение Дальтона введен поправочный коэффициент — экспериментально определяемая массообменная характеристика сырья $\varepsilon_F$.

На массообменные характеристики оказывают влияние сорт, условия выращивания и физическое состояние сырья (механическое травмирование, микробиологические процессы, степень зрелости, прорастание).

3. Вследствие полупроницаемости оболочек клеток, стенки межклетников покрыты пленкой чистой воды. Упругость пара в межклетниках можно считать насыщающей. Над механически травми-

рованными участками ткани она ниже насыщающей всего на 0,5—1,5%.

4. Плоды и овощи, непрерывно выделяющие энергию дыхания, представляют собой тела с внутренними источниками тепла, поэтому при относительной влажности воздуха 100% они продолжают терять влагу, хотя и в минимальном количестве.

5. Насыпь сочного растительного сырья с известным приближением можно рассматривать как изодисперсную систему, состоящую из влажных капиллярнопористых тел, на которую распространяется отношение Льюиса, вытекающее из аналогии между тепло- и влагообменом. Медленный переход тепла и влаги к воздуху с повышенной влажностью и обусловленная этим неизменность зоны испарения создают при хранении плодов и овощей благоприятные условия для соблюдения указанной аналогии.

6. Влаговыделения, ослабляющие тургор и снижающие иммунитет растительной ткани к микроорганизмам, — «неизбежное зло» при отводе физического и физиологического тепла воздухом, поэтому единственно правильным методом исследования влагообмена является сопоставление его с полезным теплообменом.

7. Получены простые расчетные формулы, пригодные для качественной и количественной оценки влагообмена плодов и овощей с воздухом. Вывод их оказался возможным благодаря использованию аналогии между тепло- и влагообменом, экспериментально определяемых массообменных характеристик и эмпирической зависимости концентрации водяного пара от температуры.

8. Существенное влияние на влагообмен при относительной влажности меньше 100% оказывает перепад температур на границе сырье—воздух. При уменьшении перепада температур ниже 1°С потери влаги резко возрастают.

9. При обычных режимах охлаждения плодов и овощей влаговыделения за период охлаждения практически не зависят от скорости воздуха.

10. Увеличение скорости воздуха с относительной влажностью ниже 100% заметно усиливает влаговыделения плодов и овощей в процессе изотермического хранения.

11. Относительная влажность воздуха мало влияет на влаговыделения плодов и овощей за период охлаждения, причем степень указанного влияния уменьшается с ростом перепада температур.

12. Снижение относительной влажности воздуха при изотермическом режиме хранения значительно увеличивает влаговыделения, особенно при слабой влагоудерживающей способности сырья (моркови, сахарной свеклы, капусты).

13. При обычных режимах охлаждения плодов и овощей размеры их практически не оказывают влияния на общие влаговыделения за период охлаждения. Эта закономерность приближенно соблюдается и при хранении, если отвод физиологического тепла осуществляется периодически. При изотермическом отводе физио-

логического тепла в процессах хранения с уменьшением размеров плодов и овощей потери влаги растут в тем большей мере, чем ниже относительная влажность воздуха.

14. Зависимость влаговыделений сырья от температуры хранения носит экспоненциальный характер.

15. Скорость воздуха и перепад температур при относительной влажности 100% не отражаются на потерях влаги. Геометрический размер при этих условиях оказывает влияние постольку, поскольку от него зависит в определенной мере энергия дыхания.

16. Равновесная температура плодов и овощей может быть выше и ниже температуры воздуха или равна ей. Критическая относительная влажность воздуха, отвечающая равенству температур воздуха и сырья, при которой отвод тепла дыхания осуществляется только путем испарительного охлаждения, тем выше, чем меньше влагоудерживающая способность сырья. Она составляет для моркови около 99,5%, для яблок 88,4%. Влажность воздуха ниже критической приводит к большим потерям влаги сырьем со слабой влагоудерживающей способностью. Например, морковь при 0°С и относительной влажности воздуха 70% за 7 суток теряет свыше 20% первоначальной массы.

17. В насыпи плодов и овощей со слабой влагоудерживающей способностью возникают процессы саморегулирования влажностного режима, поэтому равновесная влажность воздуха в основной части насыпи, как правило, выше критической.

18. Предложены простые расчетные формулы влаговыделений и естественной убыли плодов и овощей за период охлаждения и хранения, которые могут быть использованы при нормировании потерь и разработке эффективных способов хранения сырья. Расчетные величины влаговыделений и естественной убыли удовлетворительно согласуются с опытными данными других авторов (Н. Ф. Шепс, П. Ф. Сокол, Г. Л. Басин).

## ГЛАВА III

# ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В ХРАНИЛИЩАХ

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ВЛАЖНОСТНОГО ПОЛЕЙ В НАСЫПИ СЫРЬЯ

Существует несколько способов отвода физического и физиологического тепла в хранилищах.

Так как плоды и овощи хранятся насыпью с определенным коэффициентом пористости, то естественным и наиболее подходящим холодоносителем для них является воздух.

Следует различать два способа отвода физического и физиологического тепла: основанный на организованной смене межштабельного воздуха, составляющей сущность системы принудительного вентилирования хранилищ [2], и основанный на периодической смене внутриштабельного воздуха, получившей название активного вентилирования [2, 102, 125, 170]. В качестве третьего способа следует указать случай, когда тепло отводится главным образом теплопроводностью, а роль конвективного теплообмена сырья с воздухом, вызывающим потери влаги, сведена к минимуму. Этот способ по ряду причин (не теплофизического характера) в настоящее время имеет ограниченное применение.

Наибольшее распространение получает способ активного вентилирования сочного растительного сырья атмосферным воздухом или смесью атмосферного и рециркуляционного воздуха.

Трудно объяснить причины распространения на холодильниках (в охлаждаемых фруктохранилищах) канальной воздушной и смешанной систем охлаждения, которые являются по существу, системами принудительного вентилирования. Наиболее крупным недостатком принудительного вентилирования является вредное влияние на относительную влажность воздуха внешних теплопритоков. При активном вентилировании штабелированного сырья или насыпи его (при хранении навалом) внешние теплопритоки через боковые ограждения крупных хранилищ могут отразиться на влажностном режиме только той части сырья, которая расположена непосредственно у стен. Применяемое на холодильниках принудительное вентилирование приводит, особенно в южных районах страны, где в первую очередь строятся холодильники-фруктохранилища, к повышенным потерям влаги во всей массе сырья и значительному снижению эффективности дорогостоящего искусственного охлаждения.

Еще в 1958 г. была рекомендована плотная укладка ящиков с плодами в камерах холодильников и пронизывание их потоком воздуха [173, 196]. При хранении фруктов успешно применяются башенные воздухоохладители, приготавливающие воздух, который подается вентиляторами в подполье камеры и далее, проходя через ложный пол, равномерно пронизывает слой продукта [203]. Инженер Б. Эклунд [97] в докладе о новых охлаждающих системах рефрижераторных фруктовозов, применяемых шведской фирмой «Свенска Флехтфабрикен», подчеркнул, что если для перевозки на судах мороженой продукции при температуре от —20 до —30° С вентиляции не требуется, то для транспортировки дышащих грузов (фруктов) при температуре, близкой к нулю, система воздушного охлаждения и вентиляции штабелей из ящиков обязательна.

При изучении закономерностей формирования температурного и влажностного полей в массе плодов и овощей необходимо, таким образом, ориентироваться прежде всего на активное вентили-

рование, прочно занявшее ведущее место в современной технике хранения сочного растительного сырья.

Особенностью плодоовощехранилищ является малая относительная величина свободного пространства. Эффективное перемешивание приточного воздуха с воздухом помещения, обеспечиваемое в жилых, общественных и производственных зданиях современными воздухораспределителями и выравнивающее температурное поле в них, невозможно в плодоовощехранилищах.

Необходимость непрерывного отвода тепла дыхания составляет вторую особенность плодоовощехранилищ. Отвод физиологического тепла воздухом сопровождается отводом влаги, не только выделяющейся с продуктами дыхания, но и испаряющейся с поверхности плодов и овощей.

Остановимся на выяснении основных факторов, влияющих на процесс изменения состояния вентилирующего воздуха в слое сырья.

Большой практический интерес представляет роль высоты загрузки хранилищ. В литературе имеются многочисленные указания на опасность большой высоты слоя сырья, между тем по экономическим соображениям она желательна. Л. В. Метлицкий и И. Л. Волкинд [102] отмечают, что неравномерность температуры массы картофеля является одной из основных причин, ограничивающих допускаемую высоту насыпи картофеля в хранилищах с активным вентилированием, и рекомендуют не увеличивать ее более 4 *м*. Совсем недавно она составляла около 2 *м*, хотя по условиям прочности здоровых клубней с нормальным тургором высота 8—10 *м* не опасна.

При проектировании систем активного вентилирования принимают определенные удельные расходы вентилирующего воздуха. Общий расход воздуха и количество тепла дыхания, подлежащего отводу, пропорциональны высоте слоя сырья, поэтому, как показывает расчет, максимальная разность температур по высоте насыпи не зависит от ее абсолютного значения в процессе работы вентиляторов. Иные условия создаются после остановки вентиляторов, когда перемещение воздуха под влиянием разности плотностей резко замедляется. А. А. Колесник [83] отмечает, что разность температур при закромном способе хранения (без активного вентилирования) составляет 4—5° С (максимум на 0,10—0,25 *м* от поверхности), хотя иногда достигает и 8° С. Чем выше температура, тем большая разность температур наблюдается по высоте, что объясняется ростом тепла дыхания.

Закономерности формирования температурного поля при естественной вентиляции не изучены. Некоторые, хотя и недостаточно четкие выводы можно сделать на основании анализа работ П. А. Шепелева [180]. При неупорядоченной естественной вентиляции высота слоя сырья оказывает отрицательное влияние на расход вентилирующего воздуха. Если отсутствует доступ приточному воздуху в насыпь сырья снизу, циркуляция его прекращается.

Для проверки влияния высоты слоя сырья на максимальную разность температур, возникающую в нем при хранении, нами совместно с инженером В. И. Ивахновым были поставлены опыты на Одесском консервном заводе им. В. И. Ленина в сезоне 1966/67 г. при хранении моркови с применением кондиционирующих установок. В табл. 11 приводятся результаты наблюдений, показывающие влияние режимов вентилирования на разность температур по высоте сырья.

Таблица 11

| Режим вентилирования | Максимальная разность температур, °С | |
|---|---|---|
| | Хранилище № 1 | Хранилище № 2 |
| Активное вентилирование охлажденным воздухом . . . . . | 0,9 / 1,4 | 0,9 / 1,4 |
| Гравитационное вентилирование . . . | 1,6 | 1,2 |
| Неупорядоченные конвективные токи (воздуховоды перекрыты) . . . . | 2,1 | 1,6 |

Высота слоя сырья: в хранилище № 1 2 *м*, в хранилище № 2 1,2 *м*. Температура наружного воздуха 2—3° С, коэффициент теплопередачи ограждений 0,47 *вт/(м²·град)*, начальная температура рассола —11° С, конечная температура рассола при активном вентилировании —5° С, температура воздуха, поступающего в слой моркови, —1,2° С. В таблице в числителе — максимальная разность температур при удельном расходе воздуха 0,033 *м³/(кг·сек)*, в знаменателе — то же при удельном расходе воздуха 0,014 *м³/(кг·сек)*.

Кондиционер-воздухоохладитель в хранилище № 1 был смонтирован на уровне $^2/_3$ высоты закромов, чем и объясняется расхождение в максимальной разности температур по вертикали в период гравитационного вентилирования.

Опыты на Одесском консервном заводе им. В. И. Ленина показывают, что неблагоприятное влияние высоты загрузки хранилищ на лежкоспособность сырья, многократно наблюдавшееся на практике, можно объяснить неблагоприятными условиями, которые наблюдаются при полностью перекрытых воздуховодах, когда в слое сырья возникают неупорядоченные конвективные токи.

И. И. Адамов [1] приводит данные Е. М. Успенского и А. Г. Григорьева о влиянии высоты закромов на максимальную разность температур по высоте в условиях естественной вентиляции: 1 *м* — 3,0° С; 1,5 *м* — 3,8; 1,75 *м* — 4,4; 2,0 *м* — 4,7° С. Температура в хранилище была 2,2° С. Наиболее высокая температура картофеля наблюдалась на глубине 0,25 *м* от поверхности.

При исследовании процессов изменения состояния вентилирующего воздуха в насыпи сырья удобно пользоваться уравнением

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\Delta i G}{\Delta d G} = \frac{Q}{W}, \qquad (40)$$

где $\Delta i$, $\Delta d$ — приращение энтальпии и влагосодержания воздуха;
$G$ — расход воздуха;
$Q$, $W$ — теплоизбытки и влаговыделения соответственно.

Уравнение позволяет выяснить характер и причины изменения относительной влажности вентилирующего воздуха по высоте хранилища. Оптимальное значение $\varepsilon_{пр} = 6{,}24 \cdot 10^6$ *дж/кг*. Если тепловыделения велики и $\varepsilon_{пр}$ больше указанной величины, относительная влажность воздуха будет уменьшаться, что вызовет более интенсивные влаговыделения в верхних слоях сырья. При меньшей величине $\varepsilon_{пр}$ возможно отпотевание сырья в верхней зоне.

В январе 1967 г. на Маковском сахарном заводе автором совместно с профессором М. З. Хелемским и инженером А. А. Мовчаном было проведено исследование тепловлажностной характеристики процессов в свекловичных кагатах. Если внешний теплообмен отсутствует, тепловлажностная характеристика процесса для этого случая будет определяться теплом дыхания и влагой, выделяемой за счет испарения и дыхания. В табл. 12 приводятся расчетные значения $\varepsilon_{пр}$, полученные на основании анализа нормативных данных по потерям сахара и общей убыли массы сахарной свеклы за 100 суток хранения по трем группам заводов [169].

При расчетах принято, что потеря 1 *кг* сахара на дыхание сопровождается выделением $16{,}5 \cdot 10^3$ *дж* тепла. Это соответствует экспериментальным данным [156]. Количество влаги определено по разности между естественной убылью и потерями сахара.

Таблица 12

| Показатель | Группа заводов | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| *Начало хранения — 1 сентября* | | | |
| Потери сахара, *кг/кг* | 0,011 | 0,013 | 0,015 |
| Общая естественная убыль, *кг/кг* | 0,032 | 0,038 | 0,047 |
| Тепловлажностная характеристика процессов в кагатах $\varepsilon_{пр}$, $10^{-6}$ *дж/кг* | 8,67 | 8,58 | 7,75 |
| *Начало хранения — 1 октября* | | | |
| Потери сахара, *кг/кг* | 0,010 | 0,012 | 0,013 |
| Общая естественная убыль, *кг/кг* | 0,021 | 0,024 | 0,032 |
| Тепловлажностная характеристика процессов в кагатах $\varepsilon_{пр}$, $10^{-6}$ *дж/кг* | 15,03 | 16,54 | 11,05 |

Обращают на себя внимание относительно малые значения тепловлажностной характеристики процессов в кагатах при закладке свеклы на хранение с 1 сентября. Указанную закономерность можно объяснить повышенными влаговыделениями свеклы ранней копки.

Довольно закономерным оказалось уменьшение тепловлажностной характеристики процессов для третьей группы заводов, расположенных в южной зоне. Можно было ожидать обратную зависимость в связи с увеличением внешних теплопритоков в этой зоне, однако они не играют решающей роли. Все зависит, по-видимому, от относительной влажности воздуха при естественном (гравитационном) и ветровом вентилировании кагатов, которая в районах с более жарким климатом в среднем всегда ниже, чем в районах с более низкой температурой.

Данные табл. 12 имеют приближенный характер, но представляют все же определенный интерес, так как основаны на многолетних опытных данных, использованных при разработке норм потерь сахара и естественной убыли свеклы.

В течение января 1967 г. на Маковском сахарном заводе были поставлены опыты по определению фактических значений тепловлажностных характеристик процессов в свекловичных кагатах, которые вычислялись по параметрам воздуха на входе в слой свеклы и на выходе из кагата. В последнем случае в насыпи свеклы на глубину 0,4 *м* от поверхности устанавливалась деревянная шахта внутренним сечением 0,06×0,06 *м* с коническим раструбом в нижней части диаметром 0,25 *м*, в которой замерялись температура (ртутным термометром с ценой деления 0,1° С) и влажность воздуха (психрометром Ассмана). Тепловлажностная характеристика вычислялась как отношение приращения энтальпии к приращению влагосодержания воздуха. Температура свеклы в кагате была 3—5° С. Расстояние между воздуховодами 5 *м*, высота кагатов 5 *м*, ширина 25 *м*. Удельный расход воздуха около

Таблица 13

| Температура наружного воздуха, °С | Скорость ветра, *м/сек* | Место замеров | $\varepsilon_{пр}$, $10^{-6}$ *дж/кг* |
|---|---|---|---|
| *Активное вентилирование* | | | |
| 0,9 | 0,2 | Между воздуховодами | 4,8 |
| *Естественное вентилирование при открытых воздуховодах* | | | |
| —0,6 | 0,1 | Между воздуховодами | 5,6 |
| 2,0 | 2,0 | » | 2,9 |
| —0,3 | 3,0 | Над воздуховодами | 5,0 |
| —15,2 | 4,5 | » | 8,1 |

$1 \cdot 10^{-5}$ *кг/(кг · сек)*, относительная влажность наружного воздуха 85—90%. В табл. 13 приводятся опытные значения тепловлажностной характеристики процесса в свекловичных кагатах.

Обращает на себя внимание несколько неожиданная закономерность: с понижением температуры вентилирующего воздуха тепловлажностная характеристика процессов в кагатах возрастает. Казалось бы, по мере похолодания должны увеличиваться потери тепла в окружающую среду, в результате чего числитель в уравнении (40) должен уменьшаться и, следовательно, должно уменьшаться $\varepsilon_{пр}$. Наблюдаемая на практике обратная зависимость объясняется тем, что внутри воздуховодов происходит путевой подогрев и значительное снижение относительной влажности приточного воздуха, поступающего в слой свеклы, что усиливает влаговыделения в нижней части кагата.

Несмотря на то что вентиляторы в период морозов не работали, при температуре наружного воздуха —10° С скорость гравитационного вентилирования кагатов, определенная электроанемометром АТЭ-2, оказалась соизмеримой со скоростью активного вентилирования. Она колебалась в пределах от 0,03 до 0,10 *м/сек*. В случаях же повышенной скорости ветра (4—5 *м/сек*) скорость воздуха в слое свеклы с наветренной стороны кагата на глубине 1 *м* достигала 0,2 *м/сек*.

При $\varepsilon_{пр}=2{,}9 \cdot 10^6$ *дж/кг* в верхней зоне кагата наблюдалось отпотевание, при $\varepsilon_{пр}=8{,}1 \cdot 10^6$ *дж/кг* относительная влажность вентилирующего воздуха падала до 75%. При хранении сырья с ослабленным тургором отпотевание служит главной причиной потерь. Если загрузка хранилищ происходит в теплое время года при невысокой влажности наружного воздуха, частичное увядание сырья становится неизбежным. Большие потери сырья при повышенной влажности воздуха в хранилищах и связанные с этим предостережения являются, как правило, следствием не непосредственного отрицательного влияния на сырье высокой влажности воздуха, а того обстоятельства, что при этих условиях легко проявляются дефекты в устройстве хранилищ, приводящие к отпотеванию сырья.

Если высокая влажность воздуха, способствующая поддержанию нормального тургора растительной ткани, делает ее более устойчивой по отношению к микроорганизмам, то совершенно иные условия создаются при выпадении влаги из воздуха на поверхности сырья в капельножидком состоянии (особенно если тургор сырья ослаблен). Капельная влага стимулирует микробиологические процессы. Это дало основание понятию «инфекционная капля» [132]. Сущность его сводится к следующему:

1. Начальным этапом поражения растительной ткани грибковыми заболеваниями является прорастание спор.

2. Обязательным условием для прорастания многих видов патогенных грибов является присутствие капельной влаги, например в виде росы.

3. Благоприятное влияние капель влаги на прорастание спор объясняется тем, что споры на поверхности капли оказываются во взвешенном состоянии, и это способствует питанию их кислородом, в котором они испытывают большую потребность. С другой стороны, «инфекционная капля» обогащается органическими веществами и солями, диффундирующими в нее из поверхностных клеток растения.

Специалистам хорошо известен следующий распространенный вид отпотевания и порчи насыпи сырья. В холодное время года внутри насыпи на расстоянии 0,15—0,40 *м* от верха возникает зона обильного отпотевания. В период хранения или в конце сезона в этих местах обнаруживаются очаги массового поражения сырья. Это явление неоднократно наблюдалось нами в промышленных хранилищах и описано в литературе [32, 102].

В качестве причины указанного вида отпотевания и последующей порчи сырья подчеркивается только радиационный теплообмен. Такое объяснение нельзя признать полным, потому что наиболее низкую температуру в результате радиационного охлаждения должен иметь поверхностный слой сырья и здесь следовало бы ожидать отпотевания.

С целью изучения рассматриваемого вида отпотевания сырья нами в сезоне 1966/67 г. совместно с инженером В. И. Ивахновым были поставлены специальные опыты при хранении моркови на Одесском консервном заводе им. В. И. Ленина. Применялось активное вентилирование сырья кондиционированным воздухом. Температура приточного воздуха колебалась в пределах от —1 до +1°С. Относительная влажность его поддерживалась благодаря наличию увлажнительных устройств на уровне 98—100%. Такая высокая относительная влажность воздуха позволила предотвратить увядание моркови и получить хорошие результаты, однако, несмотря на применение теплоизоляционных материалов, обеспечивающих коэффициент теплопередачи покрытий опытных закромов не ниже 0,47 *вт/(м²·град)*, в холодное время года произошло отпотевание моркови в указанной выше характерной зоне.

Обычно потери при хранении возрастают с увеличением высоты слоя сырья; в данном случае произошло обратное: в закроме с рабочей высотой 2,2 *м* потери из-за микробиологической порчи сырья составили 0,42%, в другом же закроме, высотой 1,2 *м*, потери достигли 0,91%. Это объясняется тем, что отпотевание сырья в характерной зоне дало почти одинаковые по абсолютной величине потери, но их относительная величина оказалась ниже в закроме большей емкости.

С целью изучения причин отпотевания при укладке сырья в одном из хранилищ были размещены медно-константановые термопары через каждые 80 *мм* сверху на глубину 0,4 *м*. Принципиальная схема опытного хранилища показана на рис. 4. Деревянный корпус *1* имел снаружи теплоизоляционный слой из стекловолокна толщиной 0,14 *м*. В качестве пароизоляционного материа-

ла был использован рубероид и битум марки А. В нижней части закром имел ложное решетчатое дно *2*. В период охлаждения моркови и при потеплении во время хранения воздух, прошедший через насыпь сырья, по воздуховоду *3* подавался вентилятором в воздухоохладитель *4* и далее по нагнетательному воздуховоду *5* направлялся в подполье, откуда снова поступал в слой сырья.

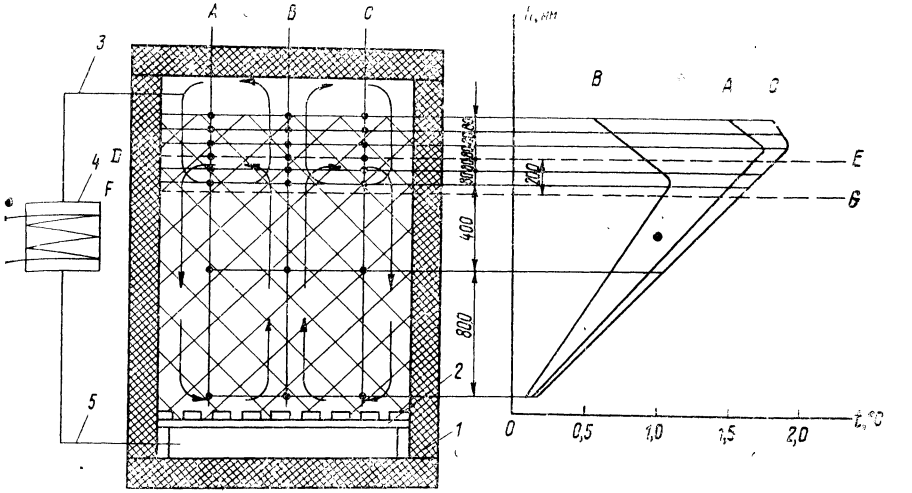



Рис. 4. Температурное поле в зоне отпотевания сырья:

*DEGF* — зона отпотевания сырья; *A* — температурная кривая экранированного участка; *B* — температурная кривая незащищенного участка; *C* — температурная кривая участка с обверткой корнеплодов жатой алюминиевой фольгой.

Опытные закрома были размещены под навесом на территории Одесского консервного завода им. В. И. Ленина. С наступлением устойчивых морозов вентиляторы были выключены. При температуре наружного воздуха, колебавшейся в пределах от —10 до —12° С, температурное поле в закроме стабилизировалось, причем на уровне 0,32—0,40 *м* сверху выявился характерный излом температурной кривой *B*, показанной на рис. 4.

Из рисунка видно, что температура моркови по мере увеличения высоты сначала увеличивается, достигает максимума на уровне 0,32—0,40 *м* от верха, а затем плавно понижается по мере приближения к поверхностному слою. В нижней зоне температура моркови была 0,1° С, на уровне 0,32—0,40 *м* от верха она оказалась максимальной и достигла 1,1° С, в поверхностном слое температура составляла 0,6° С.

Указанный характерный вид температурной кривой по высоте слоя сырья в период морозов при отсутствии активного вентилирования позволил установить наличие в насыпи сырья двух замкнутых циркуляционных токов воздуха. В период морозов крышка

закрома имела температуру ниже температуры поверхностного слоя сырья. Охлаждаемый крышкой закрома воздух опускался вниз, пронизывал верхний слой сырья, нагревался и снова поднимался вверх. Так возникал верхний циркуляционный ток воздуха. Он оказывал осушающее действие на морковь, так как влагоемкость нагреваемого воздуха увеличивается. Побудительной силой нижнего циркуляционного тока служили стенки закромов. Воздух межкорневого пространства, соприкасаясь с относительно холодными стенками закрома, охлаждался и как более тяжелый опускался вниз. По оси закрома под влиянием тепла дыхания сырья возникал восходящий поток воздуха, однако он не достигал верхнего уровня сырья, а охлаждался и, становясь более холодным, вовлекался в ниспадающий поток, как только достигал слоя моркови, охлаждаемого верхним циркуляционным током, а также путем непосредственного контакта между корнями, т. е. путем теплопроводности. Последнее обстоятельство, как будет показано ниже, имеет весьма существенное значение. Восходящий ток воздуха нижнего циркуляционного контура, достигая холодного слоя корней, охлаждался, и при этом из него выпадала конденсационная влага. Таким образом, зона *DEFG*, в которой происходит охлаждение воздуха нижнего циркуляционного контура, является зоной конденсации водяного пара, т. е. зоной отпотевания сырья. При разборке сырья на глубину 0,5 *м* в указанной зоне был обнаружен отчетливо видимый отпотевший слой моркови, а к концу хранения здесь были выявлены корни, пораженные склеротенией.

Было высказано предположение, что уровень расположения зоны отпотевания определяется интенсивностью циркуляции воздуха в верхнем контуре, радиационным теплообменом между верхним слоем сырья и крышкой закрома, а также теплофизическими характеристиками насыпи сырья, в частности ее коэффициентом температуропроводности. Для проверки этого предположения был поставлен следующий опыт.

На расстоянии 0,4 *м* друг от друга были выделены на поверхности насыпи три участка площадью 0,1 $м^2$ каждый. На первом морковь оставалась нетронутой, и температурная кривая в этом месте оказалась прежней. Она обозначена на рисунке буквой *B*.

Второй участок был защищен от радиационного теплообмена тремя экранами из алюминиевой фольги. Первый экран был размещен параллельно крышке закрома на расстоянии 50 *мм* от верхнего уровня моркови, второй над ним — на расстоянии 0,1 *м* от первого, третий над вторым — на том же расстоянии. Температурная кривая экранированного участка обозначена буквой *A*. Как видно из рисунка, защита от радиационного охлаждения привела к смещению зоны отпотевания вверх. Если раньше она располагалась на 0,32—0,40 *м* от верха, то после экранирования расстояние от верха до зоны отпотевания уменьшилось почти в 3 раза и составило 0,08—0,16 *м*.

На третьем участке каждый корень моркови на глубину 0,5 *м* был обернут жатой алюминиевой фольгой. Температурная кривая на этом участке обозначена буквой *С*. Понижение коэффициента температуропроводности насыпи сырья путем применения обертки из жатой алюминиевой фольги, т. е. путем искусственного ухудшения контакта между корнями, дало ощутимый эффект. Зона отпотевания в этом случае сместилась еще выше.

С целью предупреждения отпотевания сырья целесообразно наряду с надежной теплоизоляцией перекрытия хранилища применять переслойку его в верхнем тонком слое пористым сыпучим материалом с малым гидравлическим сопротивлением. Полезным является также размещение поверх слоя сырья легкого сыпучего материала, не оказывающего заметного сопротивления для воздуха. В качестве такого материала могут быть рекомендованы стружки или солома, которые размещаются в виде насыпи или в мешках. В последнем случае они применяются только в период морозов, т. е. при остановке вентиляторов. Укрытие насыпи сырья на период устойчивых морозов пористым материалом позволит переместить зону отпотевания из слоя сырья в слой защитного материала.

Помимо описанного явления, отпотевание может происходить и по другим причинам (рис. 5)

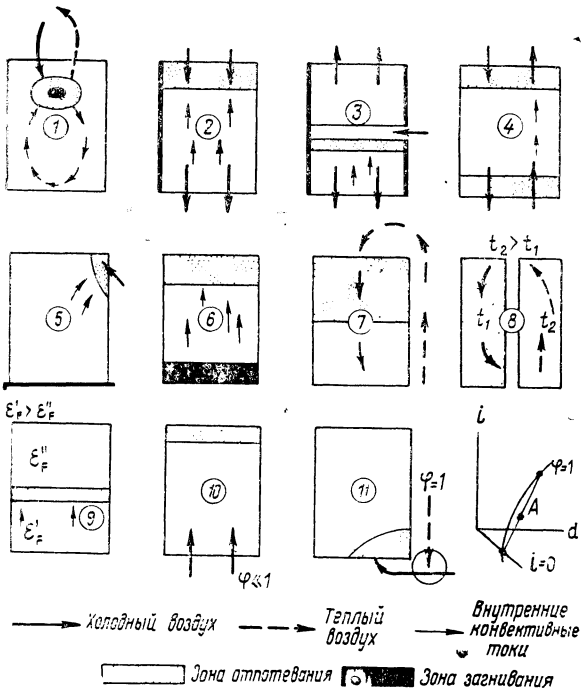



Рис. 5. К причинам отпотевания сырья.

1. Радиационное охлаждение. Этот случай рассмотрен выше. В охлаждаемых фруктохранилищах это явление возникает при батарейной системе охлаждения.

2. Верхняя подача воздуха, принятая во многих типовых проектах охлаждаемых фруктохранилищ с воздушной системой охлаждения. Обычно применяется двухпозиционное автоматическое регулирование работы вентиляторов. При работе вентиляторов верхние части штабелей сырья имеют наиболее низкую температуру. После остановки вентиляторов возникают токи естественной вентиляции, имеющие противоположное направление — снизу вверх. Так как температура нижних слоев сырья (при работе вентиляторов) выше, возможна конденсация водяного пара на холодных верхних участках штабелей.

3. Смешанная система подачи воздуха. Рекомендована Институтом хранения и переработки сельскохозяйственных продуктов в г. Вагенингене (Голландия) и применена в новой конструкции контейнеров с плотными (воздухонепроницаемыми) стенками [32]. Как видно из рис. 5, активное вентилирование сырья в нижнем контейнере осуществляется по схеме сверху—вниз. После остановки вентилятора возможна конденсация пара в верхней части нижнего контейнера.

4. Реверсивная система вентилирования. Рекомендуется некоторыми авторами с целью выравнивания температурного поля в насыпи сырья большой высоты. Наряду с некоторым уменьшением разности температур по вертикали при реверсивном вентилировании неизбежно отпотевание сырья со слабой влагоудерживающей способностью в нижней и особенно в верхней зонах.

5. Локальное охлаждение штабелей сырья при открывании дверей в зимнее время года. На охлаждаемых участках после закрывания дверей выпадает роса.

6. Образование очагов микробиологического поражения сырья в нижней зоне. Этот случай является типичным при хранении сахарной свеклы. В годы с неустойчивой погодой зимой в кагатах, особенно над входной глухой частью воздуховодов, свекла многократно замораживается и дефростируется, в результате чего загнивает. Температура в очагах поражения достигает 50° С. Восходящие потоки теплого влажного воздуха вызывают обильное увлажнение и способствуют порче здоровых корней, находящихся в верхней зоне. Защитой от этого явления может стать прямоточно-рециркуляционная система вентилирования кагатов по авторскому свидетельству № 171681 [1] с применением воздухонепроницаемых укрытий. При обычной прямоточной системе вентилирования воздуховоды перед укладкой свеклы на расстоянии 3—5 *м* от края кагата необходимо накрывать камышитовыми или

[1] В. З. Жадан, М. З. Хелемский, А. А. Мовчан. Авторское свидетельство № 171681. «Бюллетень изобретений Комитета по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР», 1965, № 11.

соломенными матами, а с наступлением морозов надежно герметизировать всасывающие патрубки вентиляторов во избежание гравитационного вентилирования кагатов.

7. Опрокинутая циркуляция воздуха. Это явление возникает при потеплении и наличии неплотностей в хранилище. В штабелях сырья при повышении температуры в хранилище возникают ниспадающие токи воздуха с выпадением росы.

8. Догрузка охлажденного хранилища теплым сырьем. Эта причина отпотевания встречается на практике довольно часто, если по организационным причинам загрузка хранилища затягивается надолго. Следует сокращать сроки загрузки и начинать охлаждение сырья только после полного окончания загрузки хранилищ.

9. Неоднородность сырья. Наличие разных видов сырья в хранилище или одного и того же вида, но с различными массообменными характеристиками (например, большое количество механически травмированных элементов сырья в нижней зоне) может стать причиной отпотевания.

10. Низкая влажность приточного воздуха. При низкой влажности приточного воздуха и подаче его снизу в нижней зоне будет происходить интенсивное испарение влаги, что может вызвать отпотевание сырья в верхней зоне ($\varepsilon_{пр} \ll 6{,}24 \cdot 10^6$ *дж/кг*).

11. Рециркуляционное вентилирование с добавкой холодного свежего воздуха.

Если влажность воздуха в хранилище близка к 100%, добавка свежего воздуха с низкой (отрицательной) температурой может привести к образованию тумана и некоторому увлажнению сырья со стороны подачи воздуха.

Формирование температурного поля в массе сырья определяется главным образом расходом, направлением движения и параметрами вентилирующего воздуха.

Значительно сложнее протекает формирование влажностного поля. Этому вопросу должно быть уделено самое серьезное внимание при проектировании хранилищ и разработке способов хранения сырья, так как увядание и отпотевание его служат главными причинами высоких потерь [185]. В южных районах страны основное зло — увядание сырья. Как будет показано в гл. IV, основное средство защиты сырья от увядания — кондиционирование приточного воздуха по влажности, а также применение двух независимо действующих охлаждающих систем (для перехвата внешних теплопритоков и полезного отвода тепла от сырья). В северных районах и средней полосе СССР типичной причиной порчи сырья является отпотевание его. Руководящим правилом защиты сырья от капельножидкой влаги должно стать широкое использование явления направленной конденсации водяного пара на поверхностях, имеющих температуру ниже температуры сырья.

Общим дополнительным средством защиты сырья от увядания и капельножидкой влаги должно стать также обоснование

оптимальной относительной влажности приточного воздуха и обеспечение ее путем использования возможностей, заложенных в самих способах хранения.

## ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ЯВНЫМ И СКРЫТЫМ ТЕПЛОМ ПРИ ОТВОДЕ ЭНЕРГИИ ДЫХАНИЯ ВОЗДУХОМ

Вентилирование сырья при хранении сводится к предотвращению самосогревания его за счет непрерывно выделяющейся энергии дыхания, т. е. к поддержанию заданной температуры. Отвод энергии дыхания осуществляется конвективным путем (явное тепло) и путем испарения влаги (скрытое тепло). Соотношение между явным и скрытым теплом должно оставаться постоянным и отвечать условиям, при которых влажностный режим по высоте насыпи сырья не будет меняться. В противном случае может происходить увядание или отпотевание сырья в верхней зоне. Оптимальное соотношение между явным и скрытым теплом отвечает оптимальному значению тепловлажностной характеристики процесса изменения состояния вентилирующего воздуха в массе сырья. Последняя представляет собой такое отношение теплоизбытков к влаговыделениям, при котором отсутствует путевое изменение относительной влажности вентилирующего воздуха в насыпи сырья.

В уравнении (40)

$$\Delta i = i_2 - i_1 ,$$

где $i_2$ — энтальпия воздуха, покидающего слой сырья, *дж/кг;*
$i_1$ — энтальпия приточного воздуха, *дж/кг*;
$i = 4190\,[0{,}24t + (597 + 0{,}45t)\,d]$;

$$\Delta d = d_2 - d_1 ,$$

здесь $d_2$, $d_1$ — конечное и начальное влагосодержание воздуха, *кг/кг*;

$$d = 0{,}622\,\frac{\varphi\, p_{\text{п}}''}{p' - \varphi\, p_{\text{п}}''} ;$$

$t_1$, $t_2$ — температура воздуха, °С;
$\varphi$ — относительная влажность, доли единицы;
$p''_{\text{п}}$ — насыщающая упругость пара при данной температуре, *н/м²*;
$p'$ — барометрическое давление, *н/м²* ($p' \approx 1 \cdot 10^5$ *н/м²*).

Подставив значения $\Delta i$ и $\Delta d$ в уравнение (40), получим

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1{,}62 \cdot 10^3\, \Delta t + (S - L) \cdot 2.50 \cdot 10^6}{S - L} ; \qquad (41)$$

$$L = \frac{\varphi_1 p''_{\text{п}_1}}{p' - \varphi_1 p''_{\text{п}_1}} ; \quad S = \frac{\varphi_2 p''_{\text{п}_2}}{p' - \varphi_2 p''_{\text{п}_2}} .$$

Входящая в уравнение (41) величина $\Delta t = t_2 - t_1$ представляет собой разность температур по высоте слоя сырья. Она меняется в узком интервале температур, причем чем совершеннее способ хранения, тем меньше $\Delta t$.

В интервале изменения указанной разности температур от 0,5 до 2,0° С в области температур, близких к 0° С, линии постоянных относительных влажностей воздуха практически параллельны между собой и в свою очередь параллельны лучу $d$—$i$-диаграммы, имеющему тепловлажностное отношение $\varepsilon_{пр} = 6{,}24 \cdot 10^6$ *дж/кг*.

В табл. 14 приведены оптимальные значения тепловлажностной характеристики процесса изменения состояния вентилирующего воздуха в насыпи сырья, полученные в результате расчетов по уравнению (41) для $t_1 = 0°$ С. Среднее значение $\varepsilon_{пр} = 6{,}24 \cdot 10^6$ *дж/кг*, или 1490 *ккал/кг*.

Таблица 14

| Подогрев воздуха, $\Delta t$, °С | Относительная влажность воздуха $\varphi_1 = \varphi_2$ | Оптимальное значение $\varepsilon_{пр}$ | | Подогрев воздуха, $\Delta t$, °С | Относительная влажность воздуха $\varphi_1 = \varphi_2$ | Оптимальное значение $\varepsilon_{пр}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $10^{-6}$ *дж/кг* | *ккал/кг* | | | $10^{-6}$ *дж/кг* | *ккал/кг* |
| 0,5 | 0,85 | 6,50 | 1550 | 2,0 | 0,90 | 6,23 | 1490 |
| 2,0 | 0,85 | 6,26 | 1490 | 1,0 | 0,95 | 6,13 | 1460 |
| 1,0 | 0,90 | 6,33 | 1510 | 1,5 | 0,95 | 6,10 | 1450 |
| 1,5 | 0,90 | 6,30 | 1500 | 2,0 | 0,95 | 6,04 | 1440 |

Как видно из табл. 14, максимальное отклонение $\varepsilon_{пр}$ от средней величины — около 4%.

По имеющимся в литературе данным, действительные тепловлажностные отношения отклоняются (обычно в сторону увеличения) от оптимального значения в несколько раз, что не всегда ощутимо отражается на качестве сырья. Это объясняется тем, что указанные отношения вычисляются для межштабельного воздуха, который оказывает воздействие только на периферийные слои штабелей. По нашим наблюдениям и данным П. Ф. Сокола [149], для воздуха в массе сырья характерна высокая относительная влажность и соответствующая ей оптимальная тепловлажностная характеристика процессов.

Оптимальное соотношение между явным $Q_я$ и скрытым $Q_{скр}$ теплом находим из следующего уравнения:

$$\frac{Q_я}{Q} = \frac{Q - Wr}{Q} = 1 - \frac{r}{\frac{Q}{W}} = 1 - \frac{r}{\varepsilon_{пр}} = 1 - \frac{2{,}5 \cdot 10^6}{6{,}24 \cdot 10^6} = 0{,}6.$$

Таким образом, для того чтобы относительная влажность вентилирующего воздуха, пронизывающего слой сырья, не менялась, необходимо, чтобы при отводе тепла дыхания на долю явного тепла приходилось 60% и на долю скрытого — 40% общего количества тепла:

$$Q_{\text{я}} = 0{,}6\,Q; \quad Q_{\text{скр}} = 0{,}4\,Q\ . \tag{42}$$

Этот вывод является одним из важнейших. Он позволяет научно обосновать требуемые значения относительной влажности воздуха при хранении различных видов сырья. В настоящее время она находится эмпирически, нередко ценой больших потерь. Например, Н. Ф. Шепс [181] правильно указывает, что относительная влажность воздуха при хранении моркови должна быть близкой к 100% и с удивлением отмечает, что такой крупный специалист, как Ф. В. Церевитинов, рекомендовал для этого вида сырья $\varphi = 80 \div 82\%$.

## ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВЕНТИЛИРУЮЩЕГО ВОЗДУХА

На основании зависимостей (21), (42) и уравнения Дальтона можно написать

$$0{,}4\,q_0 \exp(bt) = \beta F \varepsilon_F (\omega'' - \omega_c'' \varphi) r\ .$$

Решение этого уравнения с учетом соотношения Льюиса после некоторых упрощений приводит к расчетной формуле

$$\varphi_0 = 1 - \frac{q_0 \exp(bt)}{5430\,\alpha F \varepsilon_F \omega_c''}\ . \tag{43}$$

Анализ уравнения (43) показывает, что относительная влажность приточного вентилирующего воздуха должна быть тем выше, чем меньше энергия дыхания сырья, ниже его температура, больше контактная поверхность, меньше влагоудерживающая способность сырья и выше скорость движения воздуха.

Вытекающая из уравнения (43) зависимость требуемой относительной влажности воздуха от температуры подтверждается практикой.

Л. В. Метлицкий [100] указывает, что относительная влажность воздуха должна находиться в обратной зависимости от температуры.

В табл. 15 приводятся расчетные и рекомендуемые значения влажности воздуха. Температура воздуха принята: для картофеля 3° С, для остальных видов сырья 0° С; скорость воздуха 0,05 *м/сек*.

Таблица 15

| Сырье | $10^3 q$ | $d_{ср}$, м | $\rho_ф$, кг/м³ | $\alpha$ | $\varepsilon_F$ | φ, % | | Литературный источник |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | расчетная | рекомендуемая | |
| Картофель . . . . | 12,1 | 0,040 | 1080 | 4,0 | 0,012 | 95,7 | 97—98 | [181] |
| Капуста . . . . . | 14,5 | 0,180 | 670 | 2,0 | 0,370 | 99,4 | 97—98 | [181] |
| Морковь . . . . . | 13,5 | 0,035 | 1050 | 4,5 | 0,330 | 99,8 | 98—100 | — |
| Лук . . . . . | 11,0 | 0,055 | 970 | 3,6 | 0,003 | 75,7 | 70—80 | [184] |
| Томаты зеленые . . . | 14,3 | 0,055 | 1030 | 3,6 | 0,025 | 90,0 | 80—90 | [150] |

Таблица отражает важную закономерность: чем меньше влагоудерживающая способность сырья, тем хуже оно переносит низкую влажность воздуха. Требование высокой относительной влажности воздуха для моркови общеизвестно. Для лука, обладающего высокой влагоудерживающей способностью, 100%-ная влажность воздуха недопустима. Н. А. Па́лилов [122] установил, что относительная влажность воздуха в картофелехранилищах составляет 96—100%. Это хорошо согласуется с расчетной величиной.

По-видимому, эмпирически установленные параметры воздуха, рекомендуемые специалистами по хранению сочного растительного сырья, в значительной мере удовлетворяют оптимальному соотношению между явным и скрытым теплом, суммарно отводимым к воздуху (60 и 40%). Всякое резкое отклонение от этого соотношения (например, возникающее при относительной влажности воздуха для моркови 80%) будет вызывать большие потери.

Накопление данных по массообменным характеристикам сырья в разные периоды хранения и обоснование оптимальной влажности воздуха позволят свести к минимуму микробиологические процессы. При этом сократится интервал рекомендуемых значений влажности воздуха (в настоящее время нередко называют $\varphi = 85 \div 95\%$) и возрастет роль кондиционирования приточного воздуха, так как будет известно, какую именно относительную влажность необходимо поддерживать.

## РАСЧЕТ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ТЕПЛА, ВЫДЕЛЯЕМОГО ПЛОДАМИ И ОВОЩАМИ ЗА ПЕРИОД ОХЛАЖДЕНИЯ

Даже при быстром охлаждении сырья — в течение 1—3 суток — тепло дыхания может составлять 10—12% физического тепла. В основу предлагаемого нами расчета положены формула (21) и уравнение скорости изменения температуры тела при регулярном режиме охлаждения.

Скорость изменения температуры любой точки тела при регулярном режиме охлаждения прямо пропорциональна температурному напору в данной точке [173, стр. 42]:

$$\frac{dt}{d\tau} = -m(t - t_c) , \qquad (а)$$

где $\tau$ — время, *сек*;
$t_c$ — постоянная температура вентилирующего воздуха, °С;
$t$ — переменная температура охлаждаемого тела, °С;
$m$ — темп охлаждения, зависящий от теплофизических свойств (температуропроводности) сырья, геометрических размеров отдельных элементов сырья или тары и от скорости воздуха, 1/*сек*.

Количество тепла дыхания, выделяемого 1 *кг* охлаждаемого сырья за время $d\tau$, выражается уравнением

$$dq = q_0 e^{bt} d\tau . \qquad (б)$$

Из уравнения (а) имеем

$$d\tau = -\frac{1}{m} \cdot \frac{dt}{t - t_c} .$$

Подставив значение $d\tau$ в уравнение (б), получим

$$dq = -\frac{1}{m} q_0 e^{bt} \frac{dt}{t - t_c} . \qquad (в)$$

Для определения общего количества физиологического тепла $q_{общ}$, выделяемого сырьем при снижении температуры от $t_н$ до $t_к$, необходимо проинтегрировать уравнение (в):

$$q_{общ} = \frac{q_0}{m} \int_{t_к}^{t_н} e^{bt} \frac{dt}{t - t_c} . \qquad (г)$$

Интегрирование уравнения (г) с подстановкой и разложением степенной функции в ряд привело после упрощений к следующим расчетным формулам [60]:

при постоянной температуре охлаждающего воздуха

$$q_{общ} = \frac{[0{,}93 - 0{,}13\, b\,(t_н - t_к)]\, q_0 \left( e^{bt_н} - e^{bt_к} \right) \tau}{b\,(t_н - t_к)} ; \qquad (44)$$

при постепенном (ступенчатом или равномерном) снижении температуры охлаждающего воздуха

$$q_{общ} = \frac{[1{,}03 - 0{,}074\, b\,(t_н - t_к)]\, q_0 \left( e^{bt_н} - e^{bt_к} \right)}{b\,(t_н - t_к)} , \qquad (44')$$

где $q_{общ}$ — общее количество физиологического тепла, выделяемого 1 *кг* сырья при охлаждении от $t_н$ до $t_к$ за время $\tau$ *сек*, *дж*.

Для случая постоянной температуры охлаждающего воздуха И. Г. Алямовский [6] нашел более простое решение, однако для расчета необходима вспомогательная таблица (она приведена в его работе).

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЫРЬЯ НА ПОТЕРИ СУХИХ ВЕЩЕСТВ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ДЫХАНИЯ

Интенсивность дыхания может быть оценена по одному из следующих показателей: количеству выделяемого тепла, расходу сухих веществ на окислительные процессы, потребляемому кислороду или выделяемому углекислому газу. (В последнем случае следует иметь в виду несоблюдение баланса в первый период времени при дыхании плодов и овощей в герметически закрытом пространстве, когда выделяемый углекислый газ абсорбируется вначале тканью — явление, известное под названием эффекта Гарвея).

Зависимость потерь сухих веществ на дыхание от температуры может быть выражена уравнением

$$n_c' = n_{c_0}' \exp(b\,t), \qquad (21')$$

где $n'_c$ — потери сухих веществ на дыхание в сутки при данной температуре $t°$, % к массе сырья;
$n_{c\,0}$ — то же, но при 0° С.

Экспоненциальная зависимость интенсивности дыхания от температуры представляет собой частный случай закономерного влияния температуры на скорость реакции [206, 208], однако она нуждается в уточнении.

Анализ имеющихся в литературе опытных данных привел нас к выводу о том, что даже для одного и того же вида сырья температурный коэффициент скорости дыхания $b$ не является постоянной величиной. Для сахарной свеклы нами получена следующая формула:

$$b = 0{,}071 + 3{,}7\,n_{c_0}'.$$

Для расчетов потерь сахара на дыхание свеклы мы рекомендуем формулу

$$n_c' = n_{c_0}' \exp\left[\left(0{,}071 + 3{,}7\,n_{c_0}'\right) t\right], \qquad (45)$$

которая обобщает противоречивые на первый взгляд опытные данные разных авторов.

В табл. 16 сопоставляются расчетные величины, полученные по формуле (45), и опытные данные [146, 156, 214], показывающие потери сахара в процентах к массе свеклы в сутки.

Таблица 16

| Температура, °С | Вайна (ВНР) | | Бэр и др. (США) | | Силин (СССР) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | опыт | расчет | опыт | расчет | опыт | расчет |
| 0 | 0,012 | 0,012 | 0,0038 | 0,0038 | 0,0091 | 0,0091 |
| 5 | 0,021 | 0,021 | 0,0063 | 0,0058 | 0,0113 | 0,0121 |
| 10 | 0,038 | 0,038 | 0,0089 | 0,0089 | 0,0204 | 0,0259 |
| 15 | 0,050 | 0,068 | 0,0133 | 0,0136 | | |
| 20 | | | 0,0208 | 0,0208 | | |
| 25 | | | 0,0321 | 0,0317 | | |
| 30 | | | 0,0486 | 0,0487 | | |

Из 18 случаев только в двух, явно выпадающих из общей закономерности, расхождения между опытными и расчетными величинами не превышают 8%.

При использовании уравнения (45) нет надобности определять потери сухих веществ непосредственно при 0° С. Величина $b$ может быть получена по любым двум опытным точкам из уравнения

$$b = \frac{2{,}3 \lg \frac{n'_{c_2}}{n'_{c_1}}}{t_2 - t_1}.$$

Подставив $b$ в уравнение $n'_{c_1} = n'_{c_0} e^{bt_1}$ или $n'_{c_2} = n'_{c_0} e^{bt_2}$ можно найти $n'_{c_0}$. В уравнении (21) коэффициент $b$ также не остается постоянной величиной. Он зависит от физического состояния сырья. Для сахарной свеклы мы получили

$$b = 0{,}071 + 1{,}9\, q_0 . \tag{46}$$

Таким образом, для свеклы нами рекомендуется формула

$$q = q_0 \exp (0{,}071 + 1{,}9\, q_0)\, t . \tag{21''}$$

Между энергией дыхания и потерей сахара на дыхание для сахарной свеклы существует следующая достаточно точная зависимость:

$$q_0 = 1{,}92\, n'_{c_0} . \tag{47}$$

Это уравнение получено нами на основании имеющихся в литературе [156] опытных данных, которые хорошо согласуются с представлениями о дыхании как о процессе окисления углеводов, сопровождающемся выделением около $1{,}66 \cdot 10^7$ *дж* тепла на 1 *кг*

израсходованного на дыхание сахара. В табл. 17 приводятся значения тепла дыхания в соответствии с опытными данными [156] и результатами расчетов по формуле (21″). Опытные значения тепла дыхания начинаются с температуры 2°. Величины $q_0$ и $b$ получены нами с помощью уравнения (21), записанного для температур 10 и 20° С. Численное значение $q_0$ оказалось равным $7{,}24 \cdot 10^{-3}$ *вт/кг* (при 2° С $q = 9{,}59 \cdot 10^{-3}$ *вт/кг*).

Таблица 17

| Температура, °С | $q$, $10^3$ *вт/кг* | | Температура, °С | $q$, $10^3$ *вт/кг* | |
|---|---|---|---|---|---|
| | опыт | расчет | | опыт | расчет |
| 5 | 12,12 | 11,12 | 25 | 61,35 | 60,78 |
| 10 | 17,00 | 17,00 | 30 | 93,04 | 93,06 |
| 15 | 25,63 | 25,89 | 35 | 154,54 | 145,04 |
| 20 | 39,79 | 39,70 | | | |

В двух случаях (при температурах 5 и 35° С) расхождение между расчетными и опытными величинами составляет 9 и 7%, в остальных случаях оно менее 1%.

Таким образом, на примере сахарной свеклы показано, что обычно применяющаяся экспоненциальная зависимость интенсивности дыхания живой растительной ткани от температуры нуждается в поправке. Температурный коэффициент скорости дыхания не является постоянной величиной. Он зависит от физического состояния сырья, которое удобно оценивать интенсивностью дыхания при 0° С. Чем больше энергия дыхания при этой температуре, тем значительнее изменяется интенсивность дыхания с изменением температуры. Эту важную закономерность следует учитывать при обобщении опытных данных.

## ТЕМП САМОСОГРЕВАНИЯ СЫРЬЯ

Под темпом самосогревания насыпи корнеклубнеплодов, овощей и плодов подразумевается суточный рост их температуры в результате выделения тепла нормального аэробного дыхания при отсутствии внешнего теплообмена.

Как показывают расчетные и опытные данные, количество кислорода воздуха в самой насыпи сырья в большинстве случаев достаточно для аэробного дыхания в течение суток, но предлагаемая методика расчета изменения температуры насыпи невентилируемого сырья может быть использована и для более широкого интервала времени. Добавка самого минимального количества свежего воздуха, достаточного для поддержания аэробного дыхания, не вносит заметных изменений в тепловой баланс насыпи сырья.

Методика расчета самосогревания сырья в литературе не освещена, между тем этот процесс неизбежно возникает при хранении и служит одной из причин порчи сырья.

Сам принцип активного вентилирования хранилищ атмосферным воздухом предполагает периодическое самосогревание и охлаждение сырья. Б. Опхюз [118] считает, что, если за 10 суток температура наружного воздуха не падает ниже 4° С, местность по своим климатическим условиям непригодна для хранения картофеля без искусственного охлаждения, так как за 10 суток температура картофеля возрастает на 2,5—3,0° С. При вентилировании сырья кондиционированным воздухом обычно применяется система двухпозиционного регулирования работы вентиляторов. В период, когда вентиляторы отключены, происходит самосогревание сырья, причем температура в течение суток повышается на 0,2—1,0° С в зависимости от вида, физического состояния и температуры сырья. В большинстве случаев в буртах (например, при хранении капусты) применяются прямоточные системы вентилирования. В период морозов вентиляторы не работают, и непрерывно выделяющееся тепло вызывает локальное повышение температуры в насыпи сырья. Самосогревание возникает и при перевозках сырья в невентилируемых, герметически закрытых трюмах судов [116].

Одной из причин самосогревания корнеклубнеплодов является наличие механических загрязнений в виде земли и ботвы, которые затрудняют проникновение в насыпь воздуха. Идея хранения с предварительной мойкой картофеля [150] и сахарной свеклы [215] базируется на применении щадящего режима удаления посторонних примесей (земли), но главным образом на улучшении условий вентилирования. Насыпная плотность немытой свеклы около 650 *кг/м*$^3$, мытой 570 *кг/м*$^3$ [154]. Это значит, что на долю примесей иногда приходится по массе до 12%. Н. М. Игнатов [67] отмечает отсутствие исследований, связанных с самосогреванием свеклы, и приводит результаты своих наблюдений за работой буртоукладочных машин. При формировании кагатов большой высоты по каким-то неизученным причинам мелочь и земля скопляются в характерном месте — верхней части насыпи свеклы на глубине 1—2 *м*, где и возникают обычно очаги поражения. Н. М. Игнатов предостерегает от опасности укладки высоких кагатов, хотя при отсутствии этого явления последние эффективны по ряду теплофизических и технологических показателей. С ростом температуры, вызванным биологическими процессами, резко возрастает тепло дыхания, самосогревание развивается прогрессивно, возникают и быстро распространяются очаги загнивания сырья, в результате чего температура достигает 40—50° С и выше. П. Ф. Сокол [150] наблюдал повышение температуры загнившего картофеля до 60° С.

В основу расчета положена формула (21). Применение аналитических зависимостей для сложных биологических систем свя-

зано с неизбежными погрешностями. Эти зависимости могут отражать определенные закономерности весьма приближенно. Не составляет исключения и формула (21), которая, как показано нами на примере сахарной свеклы, нуждается в уточнении.

Обобщенные данные И. Г. Алямовского [7] по $q_0$ и $b$ не учитывают изменения физического состояния сырья в период хранения (не учитываются особенности дыхания в лечебный период, при прорастании, климактерический подъем дыхания). Несмотря на это, формула (21) пригодна для приближенных инженерных расчетов. Она охватывает достаточно широкий интервал температур.

Количество тепла (в *дж*), выделяемого невентилируемым сырьем за время $d\tau$, составляет

$$dq = q_0 e^{bt} d\tau .$$

Это тепло приводит к повышению температуры сырья на $dt°$.

$$dq = c\, dt,$$

где $c$ — удельная теплоемкость сырья, *дж/(кг · град)*.

Из сопоставления двух последних дифференциальных уравнений найдем

$$d\tau = \frac{c\, dt}{q_0 e^{bt}} .$$

После интегрирования получим основное расчетное уравнение

$$\tau = \frac{c}{q_0 b} \left( \frac{1}{e^{bt_н}} - \frac{1}{e^{bt_к}} \right), \qquad (48)$$

которое связывает начальную и конечную температуры сырья с продолжительностью выделения тепла дыхания. Отсюда

$$t_к = \frac{1}{b} \ln \frac{c}{ce^{-bt_н} - q_0 b \tau} . \qquad (49)$$

Примерные расчеты:

Пример 1. Определить темп самосогревания картофеля при $t_н = 2°$ С, $t_к = 4°$ С.

Принимаем [7] $q_0 = 0{,}01$ *вт/кг*, $b = 0{,}062$, $c = 3560$ *дж/(кг · град)*, $\tau = 8{,}64 \cdot 10^4$ *сек*.

По формуле (49) находим: при $t_н = 2°$ С разность $t_к - t_н = 0{,}26$ *град/сутки*, что почти полностью совпадает с данными Б. Опхюза [118], который приводит величину 0,25 *град/сутки*. При 4° С $t_к - t_н = 0{,}32$ *град/сутки*.

Пример 2. Температура хранения картофеля 2° С. Допустимая максимальная температура 4° С. Определить возможную продолжительность хранения картофеля без вентилирования. По формуле (48) $\tau = 5{,}94 \cdot 10^5$ *сек*, или 6,9 суток.

В примерах приняты данные, использованные для приближенного расчета Б. Опхюзом [118]. Сопоставление результатов рас-

четов показывает, что в работе Б. Опхюза допущены две неточности: 1) темп самосогревания в интервале температур от 2 до 4° С принят постоянным, в то время как при 4° С он на 23% выше, чем при 2° С; 2) не учтен экспоненциальный характер зависимости тепла дыхания от температуры. Допустимая продолжительность стоянки вентиляторов находится им как частное от деления разности температур на темп самосогревания при 2° С. В результате конечная величина составляет 8 суток вместо 6,9 по нашему расчету.

Одним из важных вопросов в практике хранения и сортоотбора является прогнозирование лежкоспособности отдельных помологических сортов сырья. Необходимо учитывать много различных факторов биохимического и теплофизического характера. В числе прочих факторов, на наш взгляд, должны играть определенную роль такие показатели, как влагоудерживающая способность сырья, а также относительная скорость самосогревания. И. Г. Алямовский отмечает, что «величина температурного коэффициента скорости дыхания позволяет судить о сроке возможного хранения» [7, стр. 42], но еще полнее лежкоспособность характеризуется относительной скоростью самосогревания сырья.

Если принять в уравнении (48) $t_к = t_н + 1$, то величина $1/\tau$ будет характеризовать относительную скорость самосогревания сырья на 1° С.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{q_0 b}{c\left(\frac{1}{e^{bt_к}} - \frac{1}{e^{bt_н}}\right)}.$$

В табл. 18 сопоставляются значения скорости самосогревания зеленого горошка при различных температурах.

Таблица 18

| Температура, °С | Скорость самосогревания | |
|---|---|---|
| | $10^5 1/\tau$ *град/сек* | *град/ч* |
| 0 | 3,22 | 0,116 |
| 10 | 7,47 | 0,269 |
| 20 | 17,56 | 0,632 |

Как видно из таблицы, самосогревание невентилируемой насыпи зеленого горошка происходит при 20° С в 5,5 раза быстрее, чем при 0° С.

В табл. 19 приводятся результаты расчета относительной скорости самосогревания различных видов сырья при температуре 10° С. За 1 принята скорость самосогревания зеленого горошка ($\varepsilon_{10}$ — коэффициент самосогревания). Значения $q_0$ и $b$ заимствованы из работы И. Г. Алямовского [7].

Таблица 19

| Сырье | $q_0$, $10^3$ вт/кг | $b$ | $10^{-3}$ $c$ | $\varepsilon_{10}$ |
|---|---|---|---|---|
| Зеленый горошек . . . | 113,3 | 0,085 | 3,68 | 1,000 |
| Кукуруза в початках молочной стадии зрелости | 85,1 | 0,088 | 3,77 | 0,899 |
| Шпинат . . . . . | 56,1 | 0,135 | 3,98 | 0,776 |
| Земляника . . . . . | 45,0 | 0,094 | 3,85 | 0,639 |
| Персики . . . . . | 23,6 | 0,114 | 3,48 | 0,309 |
| Огурцы . . . . . | 19,7 | 0,119 | 3,68 | 0,224 |
| Груша Бартлетт . . . | 9,5 | 0,167 | 3,68 | 0,201 |
| Морковь . . . . . | 13,5 | 0,132 | 3,73 | 0,196 |
| Апельсины . . . . . | 10,6 | 0,120 | 3,81 | 0,131 |
| Яблоки . . . . . | 12,1 | 0,093 | 3,77 | 0,111 |
| Лук репчатый . . . . | 11,0 | 0,067 | 3,64 | 0,085 |
| Лимоны . . . . . | 11,2 | 0,072 | 3,73 | 0,087 |
| Картофель . . . . . | 10,0 | 0,062 | 3,56 | 0,075 |
| Клюква . . . . . | 8,00 | 0,061 | 3,81 | 0,054 |

В табл. 20 сопоставляются коэффициенты самосогревания пяти видов сырья при температурах 0, 10 и 20° С.

Таблица 20

| Температура, °С | Зеленый горошек | Груши | Морковь | Яблоки | Картофель |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1,000 | 0,088 | 0,121 | 0,108 | 0,089 |
| 10 | 1,000 | 0,201 | 0,196 | 0,117 | 0,075 |
| 20 | 1,000 | 0,452 | 0,306 | 0,126 | 0,059 |

Табл. 20 вскрывает интересную и важную особенность отдельных видов плодов и овощей, обусловленную разным соотношением энергии дыхания при 0° С и температурных коэффициентов скорости дыхания: относительная скорость самосогревания яблок мало зависит от температуры, для груш она резко возрастает с повышением температуры, а для картофеля при тех же условиях несколько снижается. Это значит, что даже кратковременное хранение груш при высокой температуре невозможно без эффективного отвода тепла дыхания, в то время как по отношению к картофелю и отчасти яблокам при той же температуре не требуется столь жестких условий. Известно, что картофель сравнительно хорошо переносит повышенные температуры хранения.

Из табл. 20 видно, что энергия дыхания моркови заметно возрастает с ростом температуры, хотя и не так значительно, как для груш.

Рассмотрим расчет самосогревания сахарной свеклы. Свекловичные кагаты обычных размеров без воздухонепроницаемых укрытий подвергаются естественной аэрации под влиянием ветра и разности температур кагатного и наружного воздуха. Иные условия создаются при хранении свеклы в крупных кагатах-складах, ширина которых достигает 60—70 *м*.

Внутренние слои корнеплодов в таких кагатах практически недоступны для ветрового и гравитационного вентилирования. Они не участвуют также во внешнем теплообмене. Поэтому в зимний период при отрицательной температуре наружного воздуха, когда вентиляторы не работают, создается (при длительных морозах) опасность самосогревания и последующей порчи свеклы.

На основании уравнений (46) и (47) путем интегрирования дифференциального уравнения теплового баланса получена следующая расчетная формула:

$$t_к = \frac{1}{b} \ln \frac{c}{ce^{-bt_н} - 16{,}6 \cdot 10^5 \tau_c n'_{c_0}}, \qquad (50)$$

где $t_к$ — конечная температура свеклы при начальной температуре $t_н$, °С;

$c$ — теплоемкость свеклы, *дж/(кг · град)*;

$n'_{c_0}$ — потери сахара, % к массе свеклы в сутки (как принято выражать эту величину в сахарной промышленности) при 0° С;

$\tau_c$ — время, *сутки*.

Табл. 21, в которой приводятся результаты расчетов по формуле (50), показывает суточный рост температуры свеклы за счет физиологического тепла.

Таблица 21

| Температура, °С | Рост температуры, °С в сутки | | |
|---|---|---|---|
| | $n'_{c_0} = 0{,}004$ | $n'_{c_0} = 0{,}008$ | $n'_{c_0} = 0{,}012$ |
| 0 | 0,20 | 0,39 | 0,61 |
| 5 | 0,28 | 0,65 | 1,06 |
| 10 | 0,44 | 1,08 | 2,05 |

Расчеты показывают, что рост температуры свеклы при отсутствии внешнего теплообмена колеблется в пределах от 0,2 до 2,0° в сутки и в значительной мере зависит от качества сырья, определяемого потерями сахара при 0° С, и температуры. На практике наблюдались случаи самосогревания свеклы на 0,7—2,0° в сутки [170].

## РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ СЫРЬЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕСТЕСТВЕННОГО И ИСКУССТВЕННОГО ХОЛОДА

Обоснование интенсивности вентилирования — важнейший вопрос при проектировании плодоовощехранилищ и их охлаждающих систем. Решение его должно быть комплексным, учитывающим теплофизические условия, технологические и экономические показатели.

В обосновании удельных расходов воздуха в хранилищах с активным вентилированием наблюдается большой разнобой. В качестве рекомендуемых расчетных значений расхода воздуха указываются такие величины [в $м^3/(т \cdot ч)$]: в Голландии 100—150, в ГДР и ФРГ 80—150 [46, 118], в отдельных штатах США и Англии 28—30 [108, 201], в центральных зонах СССР 40—60 [16]. А. А. Федоренко [163] приводит примеры еще больших расхождений.

Как будет показано ниже, размеры хранилища, климатические условия и система охлаждения в значительной мере влияют на удельный расход воздуха, поэтому вызывает сомнение сама постановка вопроса о единых нормах даже в пределах отдельных стран. В различные фазы хранения сырья (лечебный период, охлаждение, собственно хранение) требуется разная интенсивность вентилирования [101, 198]. Указаниями по методике теплотехнического расчета хранилищ для картофеля и овощей [162] предусмотрено определение удельных расходов воздуха для фазы охлаждения с проверкой при канальной раздаче воздуха по рекомендуемым значениям скорости фильтрации воздуха, которые, однако, принимаются для данного шага каналов постоянными — не зависящими от высоты слоя сырья.

Г. Л. Басин [16] отмечает, что из всех фаз работы оборудования хранилищ наиболее теплонапряженной и ответственной является фаза охлаждения сырья, и рекомендует ориентироваться на нее при расчете интенсивности вентилирования. Эту рекомендацию следует признать правильной. Охлаждать сырье по мере загрузки хранилища нельзя, так как при поступлении «теплого» сырья будет оттаивать «холодное». Такого же мнения придерживаются Г. Л. Басин [14], С. Н. Бруев [22], Р. Гуйлон и Х. Ричардсон [196].

Ниже излагается разработанная автором методика расчета расхода вентилирующего воздуха и продолжительности охлаждения сырья. Расчет ведем по фазам. Температуру приточного воздуха усредняем не для всего периода охлаждения, а только в пределах фазы. Число фаз выбираем в зависимости от климатических особенностей местности, темпа самосогревания сырья и требуемой точности расчета. При расчете составляем таблицу, в которой для каждой фазы указываем: среднюю расчетную температуру наружного воздуха $t'_н$ и при работе вентиляторов $t''_н$, а

также коэффициент рабочего времени вентиляторов (для каждой фазы отдельно). Методики обоснования $t'_н$ и $t''_н$ изложены в работах А. И. Франчука [168] и Ю. И. Зиновьева [64].

Принимаем во внимание возможное при быстром охлаждении неравенство температур сырья и воздуха, покидающего слой сырья. Запишем дифференциальное уравнение теплового баланса для фазы

$$-C\,dt = P\,V\,(t - t_п)\,d\tau\,, \qquad (а)$$

где $C$ — тепловая буферность (водяной эквивалент) охлаждаемой системы (на 1 *кг* сырья);

$$C = c\,\varepsilon_д\,\varepsilon_{ог}\,,$$

здесь $c$ — удельная теплоемкость сырья, *дж/(кг · град)*;
$\varepsilon_д$ — коэффициент, учитывающий тепло дыхания ($\varepsilon_д > 1$),

$$\varepsilon_д = 1 + \frac{q_{общ}}{c\,(t_н - t_к)}\,;$$

$\varepsilon_{ог}$ — коэффициент, учитывающий теплопритоки (теплопотери) через ограждения (в первую очередь через пол). $\varepsilon_{ог}$ может быть больше и меньше 1,

$$\varepsilon_{ог} = 1 + \frac{K_{ог}\,F_{ог}\left[\,t'_н - 0{,}5\,(t_н + t_к)\right]\tau}{c\,(t_н - t_к)}\,,$$

$K_{ог}$ — средневзвешенное значение коэффициента теплопередачи ограждений хранилища, *вт/(м² · град)*;
$F_{ог}$ — поверхность ограждений, приходящаяся на 1 *кг* сырья, *м²/кг*;
$t'_н$ — средневзвешенное значение температуры наружного (для данного помещения) воздуха, °С.

(При вычислении $\varepsilon_{ог}$ необходимо принимать во внимание конструкцию хранилища и учитывать только те теплопритоки, которые оказывают влияние на параметры вентилирующего воздуха.)

$V$ — удельный расход вентилирующего воздуха, *м³/(кг · сек)*;
$t$ — переменная температура сырья, °С;
$t_п$ — средняя для фазы температура приточного воздуха, °С.

$$t_п = t''_н + 8 \cdot 10^{-4}\,\frac{\Delta H}{\eta}\,,$$

здесь $t''_н$ — средняя для фазы температура наружного воздуха при работе вентиляторов, °С;
$\Delta H$ — напор, развиваемый вентиляторами, *н/м²*;
$\eta$ — к. п. д. вентиляторов;
$P$ — характеристика условий охлаждения.

$$P = \varepsilon_р\,\rho\,c_р\,\varepsilon_п\,\xi\,, \qquad (б)$$

здесь $\varepsilon_р$ — коэффициент рабочего времени вентиляторов,

$$\varepsilon_р = \frac{\tau_р}{\tau};$$

$\tau_р$ — продолжительность работы вентиляторов;
$\tau$ — общая продолжительность фазы;
$\rho$ — плотность наружного воздуха, *кг/м*³;
$c_р$ — теплоемкость воздуха, *дж/(кг · град)*;
$\varepsilon_п$ — коэффициент подогрева воздуха, учитывающий неравенство температур сырья и вентилирующего воздуха, покидающего слой сырья,

$$\varepsilon_п = \frac{t_{ух} - t_п}{t_{ср} - t_п},$$

здесь $t_{ух}$ — температура воздуха, покидающего слой сырья, в данный момент, °С;
$t_{ср}$ — средняя температура сырья в тот же момент, °С.

Для расчета следует принимать среднее значение экспериментально определяемой характеристики системы воздухораспределения $\varepsilon_п$. Она зависит от степени равномерности воздухораспределения (расстояния между приточными щелями, величины контактной поверхности), скорости охлаждения, а также условий теплообмена между воздухом и сырьем, которые учитываются отношением Bi/Fo.

Н. М. Караваев и В. П. Майков [71] считают, что при Fo>4 в большинстве случаев кривые охлаждения центра и поверхности элементов зернистого материала практически совпадают. Продолжительность охлаждения сырья в холодильниках редко бывает меньше суток. При использовании естественного холода (т. е. при хранении более 95% всего сочного растительного сырья) охлаждение редко заканчивается за 10 суток. Расчет по уравнению (19) показывает, что температурным градиентом внутри охлаждаемых элементов сырья можно пренебречь.

При эффективной системе воздухораспределения и медленном охлаждении $\varepsilon_п$=1,0, при быстром охлаждении и недостаточной контактной поверхности между воздухом и сырьем (хранение сырья в таре) ожидаемое значение $\varepsilon_п$=0,7÷0,9.

Входящий в уравнение (б) коэффициент $\xi$ учитывает влияние влагообмена на теплообмен. Он представляет собой отношение общего (полного) количества тепла, ассимилированного воздухом, к количеству явного тепла:

$$\frac{Q}{Q_я} = \frac{G\,\Delta i}{G c_p\,\Delta t} = \frac{\sigma F\,\Delta i'}{\alpha F\,\Delta t'},$$

где $G$ — расход воздуха;
$F$ — поверхность теплообмена;
$\sigma$ — коэффициент влагообмена;
$c_р$ — теплоемкость воздуха;

$\Delta i$ — разность энтальпий;
$\Delta t$ — разность температур;
$\Delta i'$ — энтальпийный напор;
$\Delta t'$ — температурный напор.

Как видно, коэффициент $\xi$ по своей природе служит поправочным коэффициентом при переходе от температурного к энтальпийному напору (или от разности температур к разности энтальпий). Поэтому мы назвали его энтальпийным коэффициентом. В холодильной технике его принято называть коэффициентом влаговыпадения, что неудачно по двум причинам: а) не подчеркивается его тепловой характер, б) выпадение влаги из воздуха — частный случай.

В настоящей работе указанный коэффициент учитывает не выпадение влаги из воздуха, а ее выделение (испарение) в воздух.

Методика обоснования энтальпийных коэффициентов не разработана. По весьма ориентировочным данным Г. Л. Басина [17], для картофеля и овощей, кроме капусты, $\xi = 1{,}6 \div 1{,}8$, для капусты $\xi = 2{,}3$. По другим данным, для плодов $\xi = 1{,}05 \div 1{,}10$ [32], для сахарной свеклы $\xi = 1{,}90$ [214, 215].

Исходя из определения энтальпийного коэффициента, его можно выразить уравнением

$$\xi = \frac{\alpha F \Delta t' + \beta F \varepsilon_F \Delta \omega r}{\alpha F \Delta t}$$

или

$$\xi = 1 + \frac{\beta}{\alpha} \varepsilon_F \frac{r}{M}. \qquad (51)$$

Как видно из рис. 2, с понижением перепада температур, начиная с 1° С, параметр $M$ резко уменьшается. Анализ уравнения (51) позволяет сделать следующие выводы:

1. Энтальпийный коэффициент зависит от вида продукта ($\varepsilon_F$) и режима отвода тепла ($M$).

2. При хранении энтальпийный коэффициент больше, чем при охлаждении (имеется в виду $\varphi < 1$).

3. В процессе охлаждения энтальпийный коэффициент — переменная величина. По мере уменьшения перепада температур, начиная с 5° С, он увеличивается.

Оптимальное значение энтальпийного коэффициента 1,67. При этом относительная влажность охлаждающего воздуха, пронизывающего насыпь сырья, не будет меняться.

Проинтегрировав уравнение (а), получим

$$V = \frac{C}{P\tau} \ln \frac{t_н - t_п}{t_к - t_п}, \qquad (52)$$

Расчет удельного расхода воздуха с помощью уравнения (52) рекомендуется вести по условиям первой фазы охлаждения, для чего должны быть определены параметры приточного воздуха в этой фазе.

Как видно из уравнения (52), в числе прочих факторов на величину удельного расхода воздуха влияют скорость охлаждения (т. е. снижение температуры с $t_н$ до $t_к$ за время $\tau$), а также степень приближения $t_к$ к $t_п$. При выборе указанных величин учитываются особенности и ценность сырья, что сводится в большинстве случаев к экономическому обоснованию оптимального значения $V$. Это можно сделать с помощью уравнения (52) при наличии данных о влиянии продолжительности охлаждения на потери.

Из уравнения (6) и (52)

$$\varepsilon_п = \frac{C}{\varepsilon_р \rho c_р \xi V \tau \ln \dfrac{t_н - t_п}{t_к - t_п}} . \qquad (53)$$

Формула (53) полезна при испытании хранилищ, так как она позволяет количественно оценить важнейшую характеристику системы активного вентилирования — эффективность воздухораспределения.

Н. А. Головкин [41] установил, что скорость охлаждения растительной ткани до близкриоскопических температур влияет на степень переохлаждения ее и продолжительность пребывания в переохлажденном состоянии.

Разработанные им теория и оптимальные режимы эффективного хранения яблок при отрицательных температурах дополнены в последнее время исключительно важными в практическом отношении выводами о целесообразности медленного охлаждения яблок, обеспечивающего постепенную адаптацию их к низким температурам [42].

Поскольку фактор времени при охлаждении играет существенную роль, охлаждение должно производиться по заранее составленной программе, отвечающей технологическим требованиям. Для расчетов в этом случае используется уравнение

$$\tau = \frac{C}{P V} \ln \frac{t_н - t_п}{t - t_п} , \qquad (54)$$

где $\dfrac{t_н - t_п}{t - t_п}$ — величина, обратная безразмерной температуре сырья;

$t$ — переменная (по фазам) температура сырья, °С. В предельном случае $t = t_к$.

Формулой (54) можно пользоваться в случае применения искусственного и естественного холода, если температура приточного воздуха в пределах фазы изменяется незначительно.

Б. Опхюз [118] отмечает, что при одинаковой температуре воздуха увеличение интенсивности вентилирования вдвое сокращает продолжительность охлаждения в 2 раза, что находится в полном соответствии с формулой (54).

В опытах В. А. Донцова [53] при интенсивности вентилирования 80 $м^3/(т \cdot ч)$ в осенний период в закромах с высотой слоя клубней 2,8 $м$ температура картофеля была снижена с 17 до 4° С за 18 дней, в то время как в других закромах, с интенсивностью подачи воздуха 50 $м^3/(т \cdot ч)$, за то же время она снизилась только до 7,7° С. Температуру приточного воздуха В. А. Донцов не сообщает. Если принять ее равной 0° С, то, записав уравнение (54) для двух указанных условий, получим конечную температуру картофеля во втором случае равной 6,9° С, т. е. всего на 0,8° ниже опытной величины.

Следует отметить, что высота слоя практически не влияет на темп его охлаждения, а следовательно, и на удельный расход воздуха. Это объясняется тем, что при постоянном удельном расходе воздуха производительность вентиляторов пропорциональна высоте слоя сырья. Указанная закономерность подтверждается графиком и расчетной формулой, приведенными в работе Б. Опхюза [118]. Последняя для картофеля имеет вид

$$\tau' = \frac{13\,420}{1800 + V_F} + \frac{2130\,h}{V_F},$$

где $\tau'$ — продолжительность охлаждения сырья, находящегося на высоте $h$ $м$ от пола, до безразмерной температуры $\Theta = 0{,}1$, $ч$;

Безразмерная температура выражается уравнением

$$\Theta = \frac{t_к - t_п}{t_н - t_п},$$

где $t_н$ и $t_к$ — начальная и конечная температура сырья, ° С;
$t_п$ — температура приточного воздуха, ° С.
$V_F$ — удельный расход воздуха, приходящийся на 1 $м^2$ пола, $м^3/ч$,

$$V_F = h\,\rho_н\,V';$$

здесь $\rho_н$ — насыпная плотность сырья, $т/м^3$;
$V'$ — интенсивность вентилирования, $м^3/(т \cdot ч)$.

Подставив значение $V_F$ в исходное уравнение, получим

$$\tau' = \frac{13\,420}{1800 + h\,\rho_н\,V'} + \frac{2130}{\rho_н\,V'}.$$

Расчет по этому уравнению показывает, что при $\rho_н = 0{,}65$ $т/м^3$ и $V' = 50$ $м^3/(т \cdot ч)$ одна и та же безразмерная температура 0,1 при $t_п = 2{,}0$° С, $t_н = 12$° С и $t_к = 3$° С будет достигнута при высоте слоя сырья 1 $м$ за 72,8 $ч$ непрерывного вентилирования, а при высоте слоя сырья 4 $м$ — за 72,6 $ч$.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ ВОЗДУХОМ НИЗКОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Уже отмечалось, что свыше 95% сочного растительного сырья хранится в нашей стране с использованием естественного холода. В технологических же инструкциях и специальной литературе содержатся строгие предупреждения относительно недопустимости вентилирования хранилищ при отрицательной температуре воздуха независимо от температуры сырья. П. Гуль [46] указывает, что нельзя подавать воздух в картофелехранилище в период морозов. О. Е. Фридман и И. А. Селюк пишут: «При температуре наружного воздуха ниже 0° С вентилирование не допускается» [169, стр. 115]. То же отмечается и в других работах [31, 140, 170].

Между тем кратковременное периодическое (пульсирующее) охлаждение сырья воздухом низкой отрицательной температуры может стать важным средством совершенствования техники хранения. Оно эффективно при буртовом способе хранения с активным вентилированием в связи с невозможностью даже частичной рециркуляции внутреннего воздуха для регулирования температуры приточного воздуха. Охлаждение воздухом низкой температуры бывает целесообразным и при использовании искусственного холода, когда требуется быстрое снижение температуры продукта с минимальными потерями влаги. На практическую возможность использования низкотемпературного воздуха при хранении плодов в свежем виде указано давно [171], однако до настоящего времени нет методики расчета безопасных режимов пульсирующего охлаждения плодов и овощей воздухом отрицательной температуры, что служит основной причиной ограниченного применения этого способа охлаждения.

Опытные работы Е. П. Широкова [183] доказали высокую эффективность пульсирующего охлаждения капусты в период морозов как в технологическом, так и в технико-экономическом отношении.

Взяв за основу исходное уравнение (18), мы получили следующую расчетную формулу для определения продолжительности безопасного вентилирования сырья воздухом отрицательной температуры:

$$\tau = \frac{AR_0^2}{a} \ln \frac{B(t_н - t_c)}{t_к - t_c}, \qquad (55)$$

где $A$ и $B$ — коэффициенты, численные значения которых находятся по составленной нами табл. 22 в зависимости от Bi.

Конвективный коэффициент теплоотдачи, входящий в критерий Bi, может быть вычислен по уравнению (18):

$$\alpha = 4{,}3\,\varepsilon_л \left(\frac{w}{d}\right)^{0{,}5},$$

где $\varepsilon_л$ — введенный нами поправочный коэффициент, учитывающий повышенное значение локального коэффициента теплоотдачи на лобовой поверхности сферы (со стороны набегающего потока воздуха). Он подлежит экспериментальному обоснованию. В приводимых ниже расчетах мы приняли $\varepsilon_л = 1{,}2$.

Таблица 22

| Bi | Коэффициенты в уравнении (55) | | Bi | Коэффициенты в уравнении (55) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | *A* | *B* | | *A* | *B* |
| 0,3 | 1,1794 | 0,9400 | 0,9 | 0,4419 | 0,8283 |
| 0,4 | 0,9022 | 0,9213 | 1,0 | 0,4053 | 0,8105 |
| 0,5 | 0,7361 | 0,9019 | 1,3 | 0,3298 | 0,7596 |
| 0,6 | 0,6255 | 0,8832 | 1,6 | 0,2830 | 0,7121 |
| 0,7 | 0,5467 | 0,8646 | 1,8 | 0,2607 | 0,6823 |
| 0,8 | 0,4877 | 0,8464 | 2,0 | 0,2430 | 0,6546 |

Рассчитывая безопасный режим вентилирования продукции воздухом отрицательной температуры, необходимо предусмотреть опасность термического травмирования отдельных элементов сырья, расположенных непосредственно над отверстиями, через которые поступает приточный воздух: подмораживание и оттайка этих отдельных объектов могут привести к образованию очагов загнивания. Поэтому, определяя расчетную скорость воздуха, поступающего в насыпь продукции, необходимо вводить в числитель уравнения (30) поправочный коэффициент $\varepsilon_н$ на неравномерность воздухораспределения. Ожидаемые значения $\varepsilon_н$ от 1,3 до 2,0.

Неравномерность воздухораспределения в насыпи в определенной степени компенсируется теплообменом между нижним слоем продукции, подвергающимся воздействию приточного воздуха, и прилегающими верхними, более теплыми слоями, однако независимо от этого к воздухораспределению при пульсирующем охлаждении должны предъявляться повышенные требования.

Одним из средств улучшения воздухораспределения в самой массе сырья служит правильный выбор соотношения площадей приточных и выходных отверстий при воздухонепроницаемом укрытии боковых сторон штабеля (насыпи). Площадь выходных отверстий должна быть в 4—6 раз меньше площади приточных отверстий. При этом в самой массе сырья создается статическое давление, способствующее более эффективному воздухораспределению. Для пульсирующего охлаждения равномерное щелевое воздухораспределение через всю поверхность пола предпочтительнее канальной системы.

Вопрос о выборе конечной температуры сырья (точнее — его поверхности) заслуживает отдельного рассмотрения в связи с по-

ложительным явлением переохлаждения, особенно устойчивым при кратковременном воздействии на живую ткань низких температур. Н. М. Игнатов [66] установил, что свекловичные корни могут переохлаждаться до —7,5° С с последующим полным восстановлением физиологических функций. П. Н. Шемякин называет в качестве температуры переохлаждения сахарной свеклы —7° С [170]. Д. И. Жуковский [63] на основании опытов утверждает, что картофель безболезненно переносит переохлаждение до —6,5° С. Несмотря на возможности переохлаждения, мы рекомендуем конечной температурой сырья при пульсирующем охлаждении считать криоскопическую температуру. При этом переохлаждение будет обеспечивать запас расчета и техническую надежность этого метода использования естественного холода.

Поанализируем уравнение (55) с учетом влияния Bi на коэффициенты $A$ и $B$.

Пусть ставится задача охладить поверхность сырья от начальной температуры +2 до —3° С воздухом с температурой —30° С при значении Bi 1,0. Безразмерная температура $\Theta = \frac{-3+30}{2+30} = 0{,}844$. Оказывается, что это невозможно. В самом деле, при указанных условиях $B = 0{,}81$ и $\ln(B/\Theta)$ — отрицательная величина. Физически это означает, что температура поверхности продукта почти мгновенно снизится до значения ниже —3° С. Чем больше критерий Bi, тем менее подходящими являются условия для использования пульсирующего охлаждения. Критерий Bi, как известно, представляет собой отношение термического сопротивления охлаждаемого тела $Ro/\lambda$ к термическому сопротивлению на границе тело — среда $1/\alpha$.

Большие значения критерия Bi означают большое термическое сопротивление сырья и связанную с ним невозможность компенсировать усиленный отвод тепла с поверхностного слоя подводом тепла из внутренних слоев охлаждаемого тела. Иные условия создаются при малых значениях критерия Bi. В этом случае температурное поле в охлаждаемых объектах отличается высокой равномерностью, охлаждение поверхности сопровождается непрерывным компенсирующим подводом тепла из внутренних слоев, происходит отвод тепла от всей массы продукции при большом перепаде температур без опасности подмораживания поверхностных слоев.

Е. П. Широков на протяжении ряда лет успешно применял метод пульсирующего охлаждения при хранении капусты и получал неизменно хорошие результаты, несмотря на то что капуста с теплофизической точки зрения является наименее подходящим объектом применения низкотемпературного естественного холода.

Р. Скотт [210] отмечает, что в тканях овощей газы занимают иногда до 50% объема. Одним из наиболее пористых видов сырья является капуста. Малые коэффициенты теплопроводности капусты и ее большие геометрические размеры обусловливают большие

значения критерия Bi. Успешные опыты Е. П. Широкова свидетельствуют о богатых возможностях использования низкотемпературного естественного холода для других видов сырья, состоящего из мелких и плотных элементов (корнеклубнеплоды, фрукты).

При удельных расходах вентилирующего воздуха 50—100 $м^3/(т \cdot ч)$, принятых в практике проектирования плодоовощехранилищ, скорости воздуха в насыпи продукции не превышают 0,3 *м/сек*, а значения критерия Bi не выходят за пределы 1,5. Таким образом, достаточно высокая равномерность температурного поля внутри охлаждаемых плодов и овощей составляет отличительную особенность этого вида сырья, чрезвычайно благоприятную для разработки и внедрения системы пульсирующего охлаждения. В табл. 23 приводятся результаты расчетов процесса пульсирующего охлаждения сырья, выполненных по уравнению (55).

Таблица 23

| Показатель | Обозначение | Капуста | Картофель | Сахарная свекла |
|---|---|---|---|---|
| Определяющий размер (радиус), *м* | $R_0$ | 0,057 | 0,015 | 0,060 |
| Температуропроводность, $10^{-8}$ $м^2/сек$ | $a$ | 10,07 | 12,56 | 11,8 |
| Теплопроводность, $вт/(м \cdot град)$ | $\lambda$ | 0,34 | 0,52 | 0,46 |
| Удельный расход воздуха, $10^6$ $м^3/(кг \cdot сек)$ | $V$ | 27,8 | 13,9 | — |
| Высота слоя, *м* | $h$ | 2 | 3 | — |
| Насыпная плотность, $кг/м^3$ | $\rho_н$ | 430 | 670 | — |
| Коэффициент неравномерности воздухораспределения | $\varepsilon_н$ | 1,5 | 1,7 | — |
| Физическая плотность, $кг/м^3$ | $\rho_ф$ | 800 | 1080 | — |
| Коэффициент теплоотдачи, $вт/(м^2 \cdot град)$ | $\alpha$ | 3,6 | 12,4 | 18,8 |
| Энтальпийный коэффициент | $\xi$ | 1,87 | 1,30 | 1,38 |
| Критерий Bi | Bi | 1,3 | 0,47 | 1,4 |
| Начальная температура продукта, °С | $t_н$ | 5,0 | 5,0 | 14,7 |
| Конечная температура поверхности продукта, °С | $t_к$ | —3,0 | 0,0 | —0,8 |
| Температура воздуха, °С | $t_с$ | —20,0 | —15,0 | —9,8 |
| Допустимая продолжительность охлаждения, *ч* | $\tau'$ | 0,33 | 0,15 | 2,7 |

Значения энтальпийных коэффициентов получены нами на основании приближенных данных Г. Л. Басина [17] с введением поправочного коэффициента 0,8, учитывающего уменьшение влаговыделений с увеличением перепада температур при охлаждении плодов и овощей.

Как видно из табл. 23, безопасная продолжительность охлаждения капусты от +5 до —3° С при обычных условиях вентили-

рования составляет 0,33 *ч*, что вполне удовлетворительно согласуется с опытными данными Е. П. Широкова, который отмечает, что охлаждение тканей белых листьев продовольственной части кочана до —3,0÷—3,5° С и кроющих зеленых листьев до —5° С и ниже не сопровождается необратимыми процессами: тургор и физиологические функции ткани восстанавливаются. Многолетний опыт Е. П. Широкова дал ему основание к следующему заключению: «Экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что при максимально возможных величинах $\Delta t$ (иными словами, при любом морозе в средней зоне Советского Союза) значительных понижений температуры в бурте можно ожидать лишь при подаче воздуха в течение 1 *ч* и более. Более кратковременное вентилирование (в течение минут и тем более секунд) приводит к снижению температуры лишь в устойчивых защитных покровах кочанов с последующим постепенным и не опасным охлаждением их в глубину» [183, стр. 65]. Результаты нашего расчета подтверждают правильность этого вывода.

Почти полное совпадение расчетных и опытных величин получено и для картофеля: допустимая расчетная продолжительность охлаждения кожуры картофеля от 5 до 0° С (оптимальная температура хранения картофеля около 3° С) составила по расчету 9 *мин*, опытное вентилирование картофеля воздухом с температурой —10÷—15° С в течение 5—7 *мин* не вызвало каких-либо повреждений клубней [183].

Охлаждение одиночного корня сахарной свеклы, проводившееся нами в течение 2,5 *ч* воздухом с температурой —9,8° С, привело к снижению температуры покровного слоя с 14,7 до —0,8° С (замер производился медь-константановой термопарой). Расчетная продолжительность охлаждения (при тех же условиях) — 2,7 *ч*.

Анализ уравнения (55) позволяет сделать вывод о целесообразности пульсирующего охлаждения прежде всего при малых расходах вентилирующего воздуха, которые типичны для плодоовощехранилищ. При больших скоростях воздуха этот режим охлаждения не может быть рекомендован.

В 1968 г. с целью дополнительной проверки уравнения (55) были выполнены экспериментальные исследования пульсирующего охлаждения некоторых видов сырья. Опыты проводились в цилиндрической шахте диаметром 0,8 *м*, высотой 1,2 *м*, изготовленной из листового железа. Снаружи шахта была покрыта теплоизоляционным материалом с коэффициентом теплопроводности 0,3 *вт/(м·град)*. На расстоянии 0,4 *м* снизу была закреплена проволочная сетка, на которую укладывалось сырье (до верха шахты). На 70 *мм* ниже указанной сетки была закреплена вторая сетка для улучшения воздухораспределения и стабилизации потока. Под этой сеткой был смонтирован осевой вентилятор. Подача воздуха регулировалась изменением угла атаки лопастей вентилятора. Шахта заполнялась сырьем в помещении с температурой,

равной температуре сырья, после чего быстро вносилась в холодную камеру, где поддерживалась постоянная температура.

Наблюдения велись над элементами сырья, расположенными непосредственно на сетке в центре шахты. Температуры в лобовой точке исследуемых объектов и воздуха замерялись с помощью медь-константановой термопары и зеркального гальванометра М-95. Скорость воздуха замерялась в непосредственной близости от объекта с помощью электроанемометра марки АТЭ-2. Расчетные и опытные данные по пульсирующему охлаждению некоторых видов сырья сопоставляются в табл. 24.

Таблица 24

| Радиус $R_0$, *м* | $\alpha\,\xi$. *вт/(м²×град)* | Bi | *A* | *B* | Температура воздуха, °С | Температура сырья, °С: начальная | Температура сырья, °С: конечная | Продолжительность охлаждения, *мин*: действительная | Продолжительность охлаждения, *мин*: расчетная |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Картофель* [$\lambda = 0{,}52$ *вт/(м · град)*; $a \cdot 10^8 = 12{,}56$ *м²/сек*] | | | | | | | | | |
| 0,016 | 4,81 | 0,207 | 1,700 | 0,959 | −11,6 | 8,0 | −0,7 | 30,6 | 33,0 |
| | | | | | −21,0 | 7,6 | −0,4 | 15,1 | 16,5 |
| *Морковь* [$\lambda = 0{,}55$ *вт/(м · град)*; $a \cdot 10^8 = 13{,}76$ *м²/сек*] | | | | | | | | | |
| 0,016 | 4,81 | 0,194 | 1,778 | 0,961 | −11,0 | 8,0 | −0,5 | 28,0 | 30,5 |
| | | | | | −21,0 | 7,0 | −0,5 | 15,1 | 16,8 |
| *Яблоки* [$\lambda = 0{,}52$ *вт/(м · град)*; $a \cdot 10^8 = 15{,}35$ *м²/сек*] | | | | | | | | | |
| 0,026 | 3,77 | 0,266 | 1,365 | 0,947 | −11,0 | 8,0 | −0,5 | 47,0 | 50,5 |
| | | | | | −21,0 | 7,5 | −0,3 | 22,7 | 24,9 |
| *Столовая свекла* [$\lambda = 0{,}54$ *вт/(м · град)*; $a \cdot 10^8 = 13{,}48$ *м²/сек*] | | | | | | | | | |
| 0,029 | 3,57 | 0,629 | 1,351 | 0,946 | −11,0 | 8,0 | −0,5 | 71,0 | 76,0 |
| | | | | | −21,0 | 7,5 | −0,3 | 34,4 | 37,3 |

Как видно из таблицы, отклонения расчетных величин продолжительности безопасного охлаждения картофеля, моркови, яблок и столовой свеклы воздухом низкой отрицательной температуры от опытных данных не превышают 10%.

Проведенные теоретические исследования не исчерпывают всех вопросов, связанных с изучением и практическим использованием режима пульсирующего охлаждения плодов и овощей. Экспериментальному обоснованию подлежат коэффициенты неравномерности воздухораспределения и поправочные коэффициенты $\varepsilon_ф$, учитывающие отклонение действительной формы отдельных плодов и овощей от формы шара. Вместо $R_0$ следует подставлять в расчетные формулы $\varepsilon_ф R_0$, беря в качестве $R_0$ минимальный размер, причем $\varepsilon_ф > 1$. Интересным и трудным является вопрос о допустимой периодичности пульсирующего охлаждения продукта.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Вскрыты основные закономерности формирования температурного и влажностного полей при активном вентилировании сырья, постоянном удельном расходе воздуха и подаче его снизу. Установлено:

а) разность температур по вертикали при работе вентиляторов не зависит от высоты слоя сырья;

б) наблюдаемое на практике отрицательное влияние большой высоты слоя сырья на его качество объясняется неупорядоченными процессами, возникающими в периоды стоянки вентиляторов;

в) изменение относительной влажности восходящих потоков воздуха по высоте насыпи сырья определяется соотношением между явным и скрытым теплом. Для области температур, близких к 0° С, установлено оптимальное соотношение, при котором относительная влажность воздуха не будет изменяться: на долю явного тепла должно приходиться 60%, на долю скрытого — 40% общего количества тепла. При нарушении этих условий возможно образование зон увядания или отпотевания сырья;

г) для активного вентилирования характерно некоторое саморегулирование влажностного режима. Причины, вызывающие понижение относительной влажности воздуха, приводят к увеличению влаговыделений, что влечет за собой рост относительной влажности вентилирующего воздуха;

д) вскрыты главные причины отпотевания сырья и сформулированы условия предупреждения его. Основное из них — обеспечение направленной конденсации непрерывно выделяемого сырьем водяного пара.

2. Разработана методика обоснования оптимальной (не меняющейся по высоте насыпи сырья) влажности вентилирующего воздуха. Расчетные значения ее при 0° С и обычных расходах воздуха (для моркови 99,8%, для лука 75,7%) близки к многократно проверявшимся опытным данным.

Установлено, что относительная влажность воздуха должна быть тем выше, чем меньше энергия дыхания и влагоудерживающая способность сырья, ниже температура хранения, больше контактная поверхность и выше скорость движения воздуха.

3. Показано, что физиологическое тепло, выделяемое плодами и овощами за период охлаждения, при использовании естественного холода соизмеримо с физическим теплом.

Разработана методика расчета физиологического тепла, выделяемого за период охлаждения.

4. Установлено, что температурный коэффициент скорости дыхания, входящий в формулу Гора, даже для одного и того же вида сырья не является постоянной величиной, а зависит от его физического состояния, которое удобно оценивать энергией дыхания при 0° С. Использование этого положения позволило обобщить

одной формулой противоречивые на первый взгляд опытные данные по интенсивности дыхания сахарной свеклы, полученные в СССР, США и ВНР.

5. Разработана методика расчета темпа самосогревания сырья, неизбежного при использовании естественного холода. Расчетные величины для картофеля почти совпадают с опубликованными Б. Опхюзом опытными данными Голландского института хранения и переработки сельскохозяйственных продуктов.

6. Разработана методика обоснования важнейшего при проектировании хранилищ показателя — удельного расхода вентилирующего воздуха. Закономерности, вытекающие из расчетной формулы, удовлетворительно согласуются с опытными данными Б. Опхюза и В. А. Донцова.

7. Использование низкотемпературного (ниже 0° С) естественного холода, запрещаемое действующими технологическими инструкциями, может стать в ряде случаев средством снижения потерь сырья.

Разработана и экспериментально проверена методика расчета безопасных режимов охлаждения сырья воздухом низкой отрицательной температуры. Для широкого внедрения указанного способа охлаждения необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

## ГЛАВА IV

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИКИ ХРАНЕНИЯ СОЧНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

### ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ОТВОДА ФИЗИЧЕСКОГО И ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ТЕПЛА

В настоящей главе рассматриваются теплофизические условия хранения. При выяснении роли отдельных факторов воздушной среды предполагается, что прочие условия (сортовые особенности, условия выращивания, газовый состав воздуха) остаются неизменными. С теплофизической точки зрения насыпь плодов и овощей (без тары и в таре) следует рассматривать как зернистый материал с внутренними источниками тепло- и влаговыделений. На протяжении всего периода хранения в массе сырья протекают процессы тепло- и массообмена. От их интенсивности и направленности зависят в конечном счете результаты хранения сырья. Предупреждение увядания и отпотевания сырья составляет главную задачу техники хранения. Отвод физического и физиологического тепла — необходимый, полезный процесс. Отвод влаги — вынужденный, вредный процесс, «неизбежное зло».

*Максимальное сохранение влаги в сырье — основное требование, предъявляемое к эффективным способам хранения.* Об этом свидетельствуют многочисленные исследования [50, 80, 141, 149, 150, 170, 181] и, в частности, положительный опыт применения упаковок из полимерных материалов, а также хранение сырья в траншеях со снегованием и в ледяных складах.

Из трех основных видов теплообмена (конвекция, радиация, теплопроводность) в технике хранения широко применяется наименее благоприятный, но легко реализуемый конвективный теплообмен, который неизбежно сопровождается влагообменом. Использование радиационного теплообмена исключается, так как плоды и овощи хранятся в насыпи. Радиационный теплообмен, там, где он возникает, ухудшает температурный режим в хранилище и вызывает локальное отпотевание сырья или его увядание.

Оптимальные условия в отношении сохранения влаги в сырье создаются в случае, когда значительная часть тепла или все тепло отводится теплопроводностью, например при хранении сырья в мелких траншеях или ящиках с переслойкой теплопроводным материалом (умеренно влажной землей или песком), при хранении некоторых видов сырья в грунте (на корню) или в бороздах [79]. Чем большую роль при теплообмене играет теплопроводность, тем меньше теряется влаги, тем выше, как правило, результаты хранения. При переслойке сырья умеренно влажным материалом известное значение имеет предотвращение условий возникновения «инфекционных капель», а также изоляция больных элементов сырья от здоровых, но главное заключается в резком уменьшении потерь влаги.

Интересны в этом отношении опыты П. Ф. Сокола [149], результаты которых, показывающие влияние способов теплообмена на влаговыделения сырья, приведены в табл. 25.

Опыты проводились в 1957/58 г. Клубни хранились в подвале до весны в планчатых ящиках с переслойкой и без переслойки.

Таблица 25

| Сорт картофеля | Потеря массы, % | |
|---|---|---|
| | ящики с переслойкой землей | ящики без переслойки |
| Стахановский . . . . | 0,6 | 11,2 |
| С 10/22 . . . . . | 0,0 | 6,2 |
| Элла . . . . . | 0,0 | 11,7 |
| Лорх . . . . . | 2,2 | 14,7 |
| Зарница . . . . . | 0,2 | 10,6 |

землей. Температура до октября держалась на уровне 15—18° С, в октябре она постепенно понизилась и в дальнейшем колебалась в пределах 3—5° С.

Как видно из табл. 25, переслойка картофеля землей в ящиках малых размеров обусловила высокую роль теплопроводности и соответствующее снижение роли конвективного теплообмена, что и обеспечило в конечном счете максимальное сохранение влаги сырьем. П. Ф. Сокол пишет: «Всасывать воду (пары) из воздуха клубни, по всей вероятности, не могут. Поэтому при хранении клубней без пересыпки землей и высокой температуре нельзя рассчитывать на сохранение их веса даже в условиях 100%-ной влажности воздуха» [149, стр. 28]. Непосредственный контакт сырья с умеренно влажным сыпучим материалом создает условия, при которых проявляются осмотические силы, поддерживающие тургор в нормальном состоянии. Нередко такой контакт приводит к восстановлению нарушенного тургора, доказательством чего служат неоднократно наблюдавшиеся факты привеса сырья при хранении в траншеях с пересыпкой влажной землей.

По данным Н. В. Сабурова, М. В. Антонова и Е. П. Широкова [141], при хранении моркови, запескованной в ящиках на 25 *кг*, с периодической засыпкой штабелей снегом отходы составили всего 1—2%. Убыли в весе не было.

С. Дженеев [51] отмечает, что при уборке корнеплодов не следует допускать разрыва между выкопкой и обрезкой ботвы, так как уже через сутки хранения с ботвой корнеплоды быстро увядают и оказываются непригодными для хранения. Он пишет: «Редька сохраняется в траншеях сечением 0,7×0,7 или 0,8×0,8 *м* с обязательной переслойкой каждого ряда редьки чистым песком или супесчаной землей без вентиляции. На 1 *т* редьки расходуется 1 $м^3$ песка. Хранение ее в буртах и траншеях без переслойки приводит на юге к быстрому огрублению тканей и образованию пустот внутри корнеплодов» [51, стр. 35].

Приведенные примеры подтверждают положительную роль отвода тепла теплопроводностью. К сожалению, еще не созданы промышленные хранилища, в которых этот процесс отвода тепла был бы преобладающим.

Имея в виду упорядочение теплофизических процессов, протекающих в хранилищах, сформулируем основные требования, предъявляемые к технике хранения сочного растительного сырья при отводе тепла воздухом и подчиненные общей задаче — максимальному сокращению потерь влаги:

1. Раздельное проведение процессов отвода физического и физиологического тепла.

2. Защита сырья от внешних теплопритоков.

3. Равномерное охлаждение всей массы сырья при оптимальном перепаде температур.

4. Обеспечение изотермического режима хранения при оптимальной влажности воздуха.

5. Предотвращение избыточного (не вызываемого необходимостью) вентилирования сырья.

Предварительное охлаждение сырья проверялось и неизменно давало положительные результаты. Условия отвода физического и физиологического тепла различны прежде всего по интенсивности тепловыделений. Если при хранении система активного вентилирования не удовлетворяет всем требованиям (в частности, не обеспечивает изотермического режима), то при охлаждении она весьма эффективна, так как равномерное и быстрое охлаждение возможно только при непосредственном контакте каждого элемента сырья с холодоносителем.

При использовании искусственного холода не вызывает трудностей поддержание оптимального перепада температур (4—8°С), при котором влаговыделения минимальны.

Влаговыделения за период охлаждения выражаются уравнением (25).

На рис. 6 показана зависимость потерь влаги от параметра $M$ в двух случаях: для $\varepsilon_F=0{,}01$ (картофель) и $\varepsilon_F=0{,}35$ (морковь). Теплоемкость сырья принята равной 3800 *дж/(кг·град)*, разность температур $t_н-t_{ко}=17°$ С, $\varepsilon_д=1$. Как видно из рисунка, увеличение отношения потенциалов переноса тепла и влаги *(M)* приводит к резкому уменьшению влаговыделений сырья с малыми значениями массообменных характеристик (картофель, яблоки). Меньшую, хотя и заметную роль играет этот параметр и для сырья со слабой влагоудерживающей способностью.

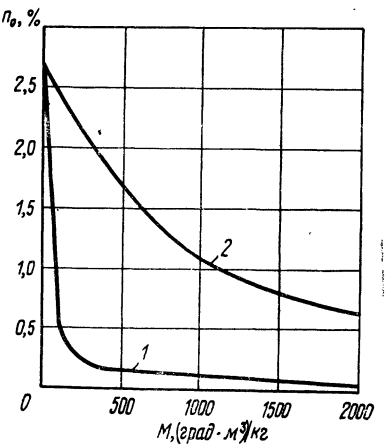


Рис. 6. Зависимость потерь влаги от параметра $M$:
$\varepsilon_F=0{,}01$ (картофель);
$\varepsilon_F=0{,}35$ (морковь).

При раздельном отводе физического и физиологического тепла возможно применение гидравлического охлаждения [173], которое особенно эффективно в сочетании с вакуумным охлаждением.

Ограждения хранилища в теплотехническом отношении должны выполнять роль адиабатической оболочки. При этих условиях в теплое время года будет предотвращаться снижение относительной влажности воздуха в хранилище, а в период морозов обеспечиваться защита от радиационного теплообмена, вызывающего отпотевание сырья.

В случае необходимости отвода физиологического тепла конвекцией максимальное сокращение потерь влаги возможно при от-

носительной влажности воздуха 100%, однако реализация этого условия затруднена, так как сырье не хранят россыпью.

При естественной вентиляции удельная площадь фильтрации должна быть максимальной [172]. Это требование не распространяется на активное вентилирование. Относительная влажность приточного воздуха часто отклоняется от оптимальной. Отрицательное влияние ее на сырье уменьшается при уменьшении доли насыпи, подвергающейся непосредственному воздействию приточного воздуха.

Подтверждение сказанному можно найти в литературе. Вайна [216] отмечает, что относительная влажность воздуха в катагах часто достигает 100%, хотя влажность приточного воздуха всегда ниже. М. З. Хелемский пишет: «По нашим наблюдениям, при нормальных условиях хранения относительная влажность воздуха в катагах держится на уровне 96—100%, несмотря на то что влажность наружного воздуха в это время колеблется от 70 до 100%» [170, стр. 139]. Таким образом, при активном вентилировании как бы происходит самопроизвольное кондиционирование воздуха по влажности самим сырьем, расположенным в нижнем слое.

При уменьшении удельной площади фильтрации и приближении влажности приточного воздуха к оптимальной меньшая доля сырья будет подвергаться воздействию воздуха с неблагоприятными параметрами.

## ИЗБЫТОЧНОЕ ВЕНТИЛИРОВАНИЕ СЫРЬЯ

Воздухообмен в насыпи сырья, превышающий предел, обусловленный поддержанием аэробного дыхания, оправдывается только в том случае, если он сопровождается полезным процессом отвода тепла (исключение составляет лечебный период для корнеклубнеплодов).

Вентилирование сырья, не вызванное необходимостью отвода тепла, или избыточное вентилирование, усиливает испарение влаги и поэтому является вредным процессом. Часто оно служит главной причиной повышенных потерь сырья.

На практике избыточное вентилирование встречается довольно часто, особенно при использовании систем активного вентилирования.

Причинами избыточного вентилирования могут явиться геометрические характеристики отдельных видов сырья и несовершенство системы активного вентилирования.

Примером сырья, подвергающегося избыточному вентилированию из-за неблагоприятной геометрической характеристики, могут служить корнеплоды. Продолжительность охлаждения корнеплода определяется снижением температуры в наиболее широкой части, поэтому избыточное вентилирование его хвостовой

части неизбежно. Увядание и порча корнеплодов начинаются обычно с хвостовой части, что неоднократно отмечалось в литературе [44, 130, 132, 170, 216]. Явление это «объясняется наиболее быстрым падением тургора этой части корнеплодов» [44]. Содержание инвертного сахара в хвостиках сахарной свеклы, по данным Хайнита [191], не превышает 5,5%, т. е. здесь оно меньше, чем в корпусе, и поэтому нельзя ожидать влияния на повышение потерь влаги такого фактора, как интенсивность дыхания. Стоклас прямыми опытами установил, что относительная интенсивность дыхания хвостиков сахарной свеклы невелика [170].

Вторая причина избыточного вентилирования связана с недостатками систем автоматического регулирования работы вентиляторов или с организацией самого процесса вентилирования. При обычно применяющихся системах невозможно локальное регулирование температуры в хранилищах. Температурный датчик устанавливается в каком-либо одном месте. При этом не исключено избыточное вентилирование в тех местах хранилища, где интенсивность дыхания сырья невелика.

Особенно опасно избыточное вентилирование в конце периода охлаждения, когда стремятся приблизить температуру сырья к температуре приточного воздуха. Снижение температуры сырья при этом может быть крайне незначительным и, как правило, не компенсирует убытки, связанные с повышенными потерями влаги.

При активном вентилировании происходит послойное охлаждение сырья, причем нижний слой (со стороны подачи воздуха) подвергается избыточному вентилированию.

Избыточное вентилирование и интенсивные влаговыделения неизбежны при непрерывной работе вентиляторов в фазе хранения сырья, между тем такие схемы рекомендуются и применяются на практике. Герберт [197] советует после периода первоначального охлаждения переводить холодильные компрессоры и вентиляторы на непрерывную работу с меньшим числом оборотов. Непрерывное вентилирование капусты И. К. Машкович [98] считает основным требованием новой технологии хранения. Пущен в эксплуатацию крупный фруктовый холодильник, в котором вентиляторы работают непрерывно [78]. Стремление обеспечить изотермический режим хранения при непрерывной работе вентиляторов приводит к значительному увеличению влаговыделений из-за малых перепадов температур, что видно из рис. 2. Анализ уравнения (29) показывает, что особенно неблагоприятные условия создаются при пониженной влажности воздуха. Чем ниже влажность воздуха, тем больше тепла отводится испарительным охлаждением, тем меньше разность температур на границе сырье—воздух, а при влажности воздуха ниже критической, определяемой уравнением (27), температура поверхности сырья оказывается ниже температуры воздуха, что резко увеличивает влаговыделения.

## КЛАССИФИКАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ХРАНЕНИЯ ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ

В названиях существующих способов хранения нередко подчеркивается второстепенное и опускается главное — то, что должно отражать особенности принятых средств и методов отвода непрерывно выделяемого физиологического тепла и их влияние на потери влаги. Например, говорят о закромном, навальном или контейнерном способах хранения, в то время как все эти способы могут быть основаны на активном вентилировании. На рис. 7 приведена схема классификации существующих способов хранения сырья. По методам отвода тепла их можно разделить на три основные группы:

1. Способы, базирующиеся на использовании теплопроводности как главного средства отвода тепла.

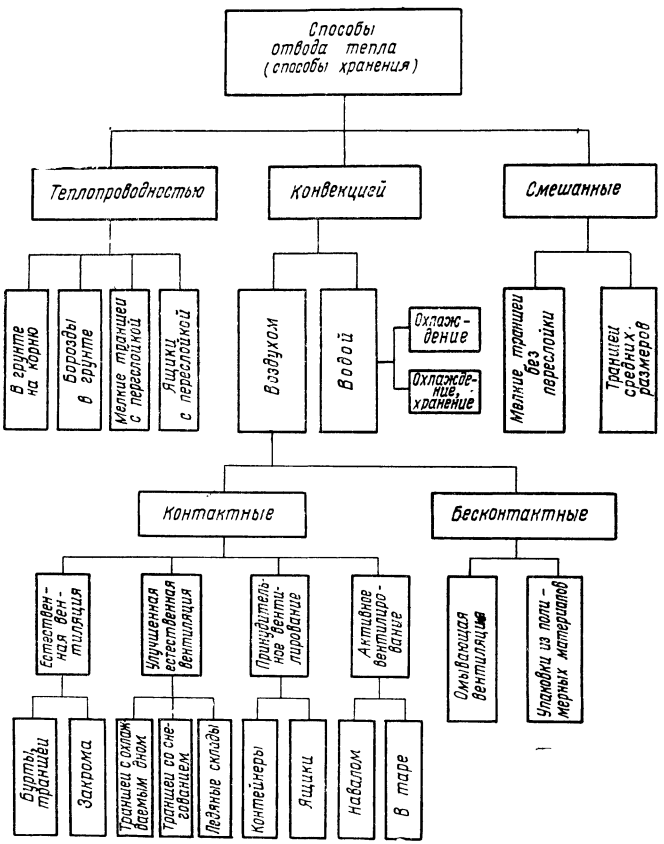



Рис. 7. Схема классификации способов хранения сырья.

2. Способы, основанные на использовании закономерностей конвективного теплообмена.

3. Смешанные способы, применение которых связано с отводом тепла конвекцией и теплопроводностью.

Первая группа отличается высокой эффективностью, и это лишний раз подчеркивает правильность того положения, что сохранение тургора сырья — важнейшее условие обеспечения высоких конечных результатов хранения.

К первой группе относятся способы хранения корнеплодов в грунте на корню, хранение капусты в бороздах, применение мелких траншей с переслойкой землей или песком, хранение сырья в ящиках с переслойкой землей или песком. Эти способы, особенно первые два, имеют ограниченное применение и не могут быть отнесены к числу промышленных, но они представляют большой интерес, так как элементы их могут быть использованы при разработке новых способов хранения сырья.

С. Дженеев [52] сообщает, что в последние годы в Крыму довольно широкое распространение получило окучивание моркови непосредственно в поле на корню с целью длительного хранения. Этот способ дает хорошие результаты.

В хозяйствах Крыма практикуется хранение капусты в бороздах глубиной 0,3—0,4 *м*, нарезаемых полуплантажным или плантажным плугом. Кочаны укладываются корнями вверх и укрываются землей. Результаты хранения хорошие.

При хранении моркови в запескованных штабелях, по данным Н. Ф. Шепс [181], выход стандартной продукции больше, чем при хранении в ящиках без применения песка. К такому же выводу пришли и другие исследователи [141]. П. Ф. Сокол [150] также отмечает, что в постоянных хранилищах морковь успешно хранят в штабелях с переслойкой песком. При этом корнеплоды остаются твердыми, свежими.

Принято считать, что в траншеях можно хранить только корнеклубнеплоды, между тем вид сырья не играет в данном случае существенной роли. Важно, каким образом отводится тепло. А. И. Мельников [99] сообщает об успешных опытах хранения яблок в траншеях с пересыпкой влажным песком. Загнивших плодов не было. Яблоки хорошо сохранились.

Многократные опыты со всей убедительностью подтвердили значение влажности материала, который применяется для переслойки сырья. При использовании сухого материала наблюдаются отрицательные результаты, что лишний раз подчеркивает важную роль теплопроводности как преобладающего способа отвода тепла при использовании способов хранения, отнесенных к первой группе.

Теплопроводность земли и песка заметно возрастает при увеличении влажности. Теплопроводность сырой земли 0,67 *вт/(м×*×*град)*, теплопроводность песка влажностью 6,9% — 1,15 *вт/(м×*×*град)* [186], т. е. выше теплопроводности корнеклубнеплодов и

овощей. По данным Н. В. Сабурова, М. В. Антонова и Е. П. Широкова [141], оптимальная влажность песка 7—13%. П. Ф. Сокол [149] предупреждает об опасности применения влажной глины, обладающей малой пористостью. При недостаточном доступе воздуха возможно кислородное голодание сырья.

Нельзя не учитывать также трудоемкости хранения с пескованием: она выше, чем при закромном хранении в 5—6 раз [29]. Расходы на пескование 1 *т* моркови достигают 4 руб. 50 коп. [141].

Большое распространение получили способы хранения, основанные на отводе тепла конвекцией при непосредственном контакте сырья с воздухом. Они легко осуществляются, так как порозность плодов и овощей составляет 35—45% по объему и вентилирование насыпи сырья не вызывает больших гидравлических сопротивлений.

Ко второй группе мы отнесли способы хранения, основанные на использовании естественной вентиляции, улучшенной естественной вентиляции, принудительного и активного вентилирования.

Естественная вентиляция не дает положительных результатов вследствие образования застойных зон самосогревания, большой неравномерности температурного поля по высоте и массовых зон отпотевания.

Чем крупнее хранилище, чем больше степень загрузки его по высоте, тем выше потери при естественной вентиляции, поэтому она применяется главным образом в буртах и траншеях. Режим хранения (температура, относительная влажность и газовый состав) в правильно устроенных буртах и траншеях создается более устойчивый и более близкий к оптимальному, чем в наземных хранилищах закромного типа [50]. Однако буртовое и траншейное хранение имеет много недостатков:

1. Затруднения с осмотром и выгрузкой продукции зимой.

2. Возможность анаэробиоза (удушья) картофеля и овощей при глинистых почвах с последующим быстрым развитием мокрой гнили.

3. Трудность механизации погрузочно-разгрузочных работ.

4. Необходимость сортировки продукции при закладке, для чего требуется дополнительная рабочая сила.

5. Большие, чем в наземных хранилищах, расходы на единицу массы сырья.

Несмотря на указанные недостатки способа хранения сырья в буртах и траншеях, он получил широкое распространение. Так, например, по данным Я. Верменко [24], более 80% семенного картофеля в УССР хранится в траншеях и буртах с естественной вентиляцией.

Хранение сырья в закромах с естественной вентиляцией сопровождается большими потерями. П. Гуль [46] отмечает, что в лучшем случае естественная вентиляция обеспечивает лишь 10% требуемого воздухообмена.

Значительно более благоприятные результаты дает улучшенная естественная вентиляция. К группе хранилищ с улучшенной естественной вентиляцией мы отнесли траншеи с охлаждаемым дном, траншеи со снегованием и ледяные склады Крылова.

В траншеях с охлаждаемым дном, разработанных А. И. Мальковским [178], обеспечено направленное движение охлаждающего воздуха снизу вверх. Приточный воздух поступает в массу сырья, расположенного на решетке. По данным В. Колтунова [79], при хранении капусты в траншеях площадью сечения 0,5×0,7 *м* и высотой 0,8 *м* с охлаждаемым дном в условиях Крыма были получены удовлетворительные результаты: отходы колебались в пределах 7,70—10,95% против 14,29—16,72% при активном вентилировании.

О положительном опыте хранения капусты в Крыму в мелких траншеях глубиной 0,5 *м* и шириной 1 *м* сообщает и П. Ф. Сокол [150]. В данном случае на дно котлована укладывался щит высотой 0,2 *м* (для образования охлаждаемого дна) и через каждые 2,5—3,0 *м* устанавливались вытяжные трубы.

Высокой стабильностью температурно-влажностного режима и эффективным использованием гравитационных сил для равномерного вентилирования сырья отличаются временные хранилища (траншеи) со снегованием, которые неизменно дают хорошие результаты. Хранение сырья в траншеях со снегованием при высокой равновесной влажности воздуха сопровождается минимальной естественной убылью и небольшими общими потерями, что свидетельствует о важнейшей роли влажностного режима. Широкое использование снегования ограничивается климатическими условиями и трудоемкостью.

По температурно-влажностному режиму траншеи со снегованием имеют много общего с ледяными складами Крылова. Их основное преимущество заключается в наличии устойчивой адиабатической оболочки и стабильном режиме хранения при высокой относительной влажности воздуха. Постоянная, близкая к температуре сырья температура ограждений хранилища уменьшает отрицательное действие радиационного теплообмена, служащего обычно причиной отпотевания. Воздух в пространстве между штабелями имеет устойчивую, близкую к 0° С температуру, внутри штабелей температура на десятые доли градуса выше, но этого достаточно для гравитационного вентилирования сырья. В ледяных складах хорошо сохраняются свежие плоды и овощи. Они не вянут, естественная убыль в 5 раз меньше, чем при хранении на холодильниках с машинным охлаждением [173].

По данным Н. Ф. Шепс [181], хранившей цветную капусту в ледяных складах Крылова при температуре —0,5÷—1,0° С и $\varphi = 96 \div 98\%$, были получены прекрасные результаты. Цветная капуста в таких условиях сохранялась до 3 и более месяцев и имела превосходный товарный вид. В холодильной же камере температура и относительная влажность воздуха колебались.

Через неделю часть наружных листьев подвяла, но головки сохранили хороший вид. К 14 ноября, через 4 недели после закладки на хранение, около половины листьев завяло, исчезла первоначальная свежесть головок.

Хорошие результаты были получены С. Н. Бруевым [22] при хранении в ледяных складах яблок. Равновесная влажность воздуха достигала 98—100%, естественная убыль плодов оказалась в 5 раз ниже, чем на холодильниках с машинным охлаждением, где относительная влажность воздуха 85—90%.

Недостатки ледяных складов: капе́ль на продукцию с ледяного перекрытия, сложность механизации трудоемких работ, стоимость хранения сырья на 30—35% выше, чем в холодильниках с машинным охлаждением. Ледяные склады нельзя сооружать в районах со средней температурой января выше —11° С.

Следует отметить, что характерная для складов Крылова капе́ль на поверхность сырья с ледяного перекрытия мало отражается на потерях. Это лишний раз подтверждает важнейшую роль сохранения тургора сырья. При хорошем тургоре сырье обладает высоким иммунитетом к микробиологическим заболеваниям даже в самых неблагоприятных условиях — при наличии «инфекционных капель».

Принудительное вентилирование (смена межштабельного воздуха) получило наибольшее распространение на холодильниках с машинным охлаждением. Оно осуществляется в воздушных системах охлаждения. Рециркулирующий воздух (с небольшими добавками свежего воздуха) обрабатывается в воздухоохладителях, после чего перемещается по каналам, расположенным обычно сверху, и поступает через приточные отверстия в свободное пространство камер, омывая штабеля снаружи в направлении, как правило, не совпадающем с направлением естественных конвективных токов влажного внутриштабельного воздуха.

Основные недостатки принудительного вентилирования:

1. Большая неравномерность температурного поля.

2. Вредное действие на сырье внешних теплопритоков (низкая равновесная влажность воздуха, особенно в южных районах страны).

3. Влияние влажности тары на влажностный режим в хранилище.

4. Значительная роль естественной вентиляции (со свойственными ей недостатками).

5. Отпотевание сырья.

Е. П. Широков правильно отмечает, что «при контейнерном хранении очень трудно (а вернее, невозможно) выровнять температуру в массе клубней» [2, стр. 57]. По его данным [182], контейнеры не обеспечивают поддержания оптимального режима хранения. При хранении картофеля в контейнерах наблюдается самосогревание и отпотевание в верхних слоях, что приводит к возрастанию потерь. О недостатках принудительного вентилиро-

вания свидетельствуют попытки создания контейнеров нового типа, в которых сырье подвергается активному вентилированию [32].

Масса ящичной тары составляет 20—40% к массе фруктов. Она отличается высокой адсорбционной способностью [121]. Опыты, поставленные П. А. Алексеевым и Л. С. Россовским [5], показали, что естественная убыль абрикосов при железнодорожных перевозках в среднем за 6,5 суток по массе брутто составила 1,02%, а по массе нетто 1,31%. При перевозке винограда масса закрытой тары увеличивалась в 3 раза больше, чем открытой. Общее увеличение массы тары происходит в результате поглощения влаги, выделяемой плодами при испарении и дыхании.

Подача воздуха в хранилища с принудительной вентиляцией производится обычно сверху, и наиболее холодными оказываются верхние части штабелей сырья. После остановки вентиляторов возникают восходящие токи влажного внутриштабельного воздуха, в результате чего происходит отпотевание сырья.

Значительным шагом в деле совершенствования техники хранения сочного растительного сырья оказалась система активного вентилирования [2, 15, 21, 23, 24, 29, 32, 53, 98, 102, 170]. Ее целесообразно применять в сочетании с навальным способом загрузки сырья. Особенности системы активного вентилирования будут подробно рассмотрены ниже. Она весьма эффективна в период охлаждения сырья, но при отводе физиологического тепла активное вентилирование имеет ряд существенных недостатков. Последнее побудило к поискам более совершенных способов отвода физиологического тепла. Руководящей идеей при этом было максимальное сокращение потерь влаги. В результате были разработаны способы бесконтактного отвода тепла к воздуху как холодоносителю:

1. Омывающая вентиляция.
2. Применение упаковок из полимерных материалов.

Как сообщают Клэйкомб и Рэйб [192], в 1957 г. в долине Сан-Луи (шт. Колорадо и Нью-Мексико) было построено картофелехранилище емкостью 2500 *т* из стали и бетона. Температура поддерживалась циркуляцией наружного или смеси наружного и внутреннего воздуха через пространство между металлическими стенками закромов. Это так называемая омывающая вентиляция.

В оптимальном варианте закрома с омывающей вентиляцией приспособлены для активного вентилирования в фазе охлаждения сырья. При переходе к собственно хранению отвод физиологического тепла осуществляется в основном через стенки закромов к омывающему их холодному воздуху, хотя определенную роль играет также процесс непосредственного омывания этим воздухом открытой поверхности сырья перед удалением воздуха из хранилища.

В Канаде и северных штатах США для омывающей вентиляции используют смесь наружного и внутреннего воздуха, что ус-

ложняет схему. Б. Опхюз [118] отмечает ограниченные возможности применения омывающей (кожуховой) вентиляции, обусловленные низкими расчетными температурами наружного воздуха.

Омывающая вентиляция сокращает естественную убыль сырья. Основным недостатком ее является отсутствие целесообразной (направленной) конденсации выделяемого сырьем водяного пара.

По имеющимся у нас сведениям, ширина закромов при омывающей вентиляции может достигать 6 *м*, что свидетельствует о явно преобладающей роли конвективного теплообмена как снаружи, так и внутри закромов и второстепенном значении передачи тепла теплопроводностью. С увеличением размеров закромов неравномерность температурного поля в массе сырья возрастает.

Этот недостаток устраняется при использовании мелких упаковок из полимерных материалов, которое основано, по существу, на идеях, заложенных в системе омывающей вентиляции. Исследованию эффективности этого способа хранения сырья (в основном плодов) за последние годы посвящено большое количество работ [35, 48, 82, 99, 109, 123, 146, 179].

К преимуществам хранения сырья в упаковках из полимерных материалов относятся:

1. Высокая, равная практически 100%, относительная влажность воздуха и малая естественная убыль сырья [82, 84, 99].

2. Возможность создания условий, имитирующих модифицированную атмосферу [146].

В литературе особо подчеркивается резкое снижение естественной убыли плодов. По данным Н. А. Моисеевой и А. А. Голенищевой-Кутузовой [109], убыль оказывается ниже по сравнению с контролем (хранением без пленки): у яблок сорта Ренет Симиренко — в 5—6 раз, сорта Ренет шампанский — в 7 раз.

Поскольку теплофизическая основа омывающей вентиляции и упаковок из пленочных материалов общая, эти два способа хранения имеют и общий недостаток, заключающийся в отсутствии направленной конденсации влаги. Роса, выпадающая на стенках герметически закрытых полиэтиленовых мешочков, вызывает образование на плодах многочисленных «инфекционных капель». То, что, несмотря на это, результаты хранения, как правило, получаются хорошие, свидетельствует о благоприятном влиянии высокого тургора живой растительной ткани на устойчивость по отношению к микроорганизмам. Эффективность бесконтактного отвода тепла воздухом, используемая в последних двух приемах хранения, может быть повышена, если организовать направленную конденсацию влаги (см. гл. V) или создать условия, при которых влаговыделения в упаковках уменьшатся.

Чем выше начальная температура сырья и чем медленнее оно охлаждается, тем больше влаги выделяется за период охлаждения. Н. В. Галченко [35] на основании обобщения зарубежного опыта подчеркивает, что быстрое предварительное охлаждение

плодов (перед укладкой их в мешочки из полиэтиленовых пленок) заметно удлиняет срок хранения.

Обильное образование росы наблюдается при хранении видов сырья с высокими массообменными характеристиками, например моркови. Н. А. Палилов и А. Г. Стариков [123] пришли к заключению, что морковь следует хранить в открытых полиэтиленовых мешках.

Незначительный ток воздуха через массу сырья под влиянием гравитационных сил способствует удалению избыточной влаги. А. Г. Гусейнов [48] рекомендует применять перфорированные полиэтиленовые мешки.

Применение упаковок из полимерных материалов представляет интерес как попытка изыскания новых, более совершенных способов хранения ценных видов сырья. Вряд ли можно рассчитывать на широкое использование небольших пленочных упаковок при промышленном хранении огромных масс овощей и корнеклубнеплодов, если принять во внимание низкий коэффициент использования емкости хранилищ, а также трудоемкость операций по упаковке и погрузочно-разгрузочных работ при этом способе хранения сырья.

К группе способов хранения, основанных на использовании конвективного теплообмена, отнесены нами способы, рассчитанные на гидравлический метод отвода тепла.

Коэффициент теплоотдачи к воде в десятки и сотни раз выше, чем к воздуху, поэтому охлаждение плодов и овощей (особенно лиственных) протекает в воде очень быстро.

По данным Г. Шаффера [179], в Англии на крупных фермах широко применяется гидроохлаждение овощей (сельдерея, цветной капусты и др.) сразу после сбора путем погружения в воду с температурой 1,7° С, после чего они лучше переносят транспортировку и дольше сохраняют свежий вид. Этот способ в течение нескольких лет используется также в США. Продолжительность охлаждения 15 *мин*; во избежание микробного обсеменения вода периодически меняется. В Швеции, США и Англии гидроохлаждению подвергают не только овощи, но и фрукты: груши, абрикосы, персики, вишни [173].

Гидроохлаждение эффективнее вакуумного охлаждения [138], которое заключается в быстром понижении давления и самоиспарении влаги из сырья за счет его теплосодержания.

Потеря влаги при этом в процентах к массе сырья может быть выражена уравнением $n'_о = 0{,}15\,(t_н - t_к)$. При начальной температуре $t_н = 23°$ С и конечной $t_к = 1°$ С $n'_о = 3{,}3\%$. По данным А. Саатчан [138], фактическая потеря влаги при вакуумном охлаждении салата достигает 3,2%. Как видно, вакуумное охлаждение ослабляет тургор сырья, что особенно ощутимо в случае лиственных овощей.

Представляет интерес сочетание гидравлического охлаждения с последующим немедленным вакуумным охлаждением. В этом

случае определенная часть испаряющейся влаги будет приходиться на воду, остающуюся на поверхности сырья после гидроохлаждения.

Отвод физического тепла водой целесообразен прежде всего при хранении сырья со слабой влагоудерживающей способностью. Его можно сочетать с мойкой сырья.

В Краснодарском научно-исследовательском институте пищевой промышленности в сезоне 1966/67 г. под руководством Ю. Г. Скориковой были проведены интересные и оригинальные опыты по отводу физического и физиологического тепла водой при хранении моркови [120]. Деревянный закром (установленный в предкамере холодильника) сечением 0,4×0,5 *м* и высотой 3,5 *м* был перегорожен по всей высоте на две части. Охлаждение воды производилось в испарителе аммиачной холодильной установки. Охлажденная вода подавалась сверху через душевое устройство и разбрызгивалась на морковь. Внизу вода собиралась в сливном баке, откуда удалялась в канализацию. Непосредственно после загрузки закрома орошение моркови проводилось два раза в сутки при общем суточном расходе воды 0,3—0,5 $м^3/т$. В процессе хранения орошение производили через 2—3 суток при среднем расходе воды 0,1 $м^3/т$ в сутки. Температура воды 0—1° С, температура моркови ~1° С. Качество моркови оказалось высоким. При разгрузке закрома в феврале корнеплоды были свежими, сочными, имели высокий тургор. Прорастания и порчи не было. В конце хранения корнеплоды имели привес: сорт Шантанэ 15,6%, сорт Нантская 25,3%. Снижение содержания сухих веществ оказалось более заметным, чем при активном вентилировании: 14 ноября содержание сухих веществ у сорта Шантанэ составляло 13,9%, 1 февраля — 9,12%.

Способ рекомендован для промышленной проверки как перспективный в южных районах. В качестве одного из основных преимуществ этого способа указывается возможность эффективного использования емкости хранилищ за счет увеличения высоты слоя моркови до 4 *м*. Гидравлический способ отвода физиологического тепла заслуживает внимания прежде всего по отношению к тем видам сырья, орошение которых не будет сопровождаться интенсивным выщелачиванием сухих веществ.

К третьей группе способов хранения отнесены способы, основанные на использовании теплопроводности и конвективного теплообмена при отводе тепла в мелких траншеях и траншеях средних размеров. Существенную роль здесь играет теплопроводность. Поэтому потери влаги небольшие и результаты хранения, как правило, вполне удовлетворительные. Мелкие траншеи обычно применяются без переслойки сырья землей или песком.

По данным И. М. Пухальского [126], в 1965 г. требовалось заготовить 90 тыс. *т* овощей и плодов для консервной промышленности одной только Ростовской области. Для хранения в траншеях лучшими оказались мелкие траншеи шириной 1,0—1,2 *м*.

В условиях Крыма вполне оправдывает себя хранение картофеля в мелких траншеях без вентиляции, предложенное П. Ф. Соколом [52]. Размеры траншей: глубина 0,5 *м*, ширина 1 *м*, длина до 10 *м*. Слой картофеля 0,4 *м*; укрытие земляное, сначала около 0,2 *м*, при понижении температуры до +2° С 0,4 *м*, позднее 0,7 *м*. В феврале траншеи засыпаются опилками или закрываются соломой слоем высотой до 0,6—0,7 *м*. Хозяйства Красногвардейского и Красноперекопского районов при закладке картофеля в траншеи пересыпают его землей слоем 0,03—0,04 *м*. Сечение траншеи 1×1 *м*, длина 10 *м*. Такое хранение дает вполне удовлетворительные результаты, но обходится в 2—2,5 раза дороже, чем в мелких траншеях.

В качестве положительных сторон траншей Б. А. Рубин и Л. В. Метлицкий отмечают стабильность температурного режима благодаря аккумулирующей роли грунта, высокую, часто близкую к 100%, относительную влажность воздуха и аутоконсервирование. Количество накапливающегося углекислого газа достигает иногда 6—8%.

Для хранения больших масс сырья (например, свеклы для сахарных заводов) траншеи непригодны из-за высокой трудоемкости погрузочно-разгрузочных работ, необходимости больших, ежегодно обновляемых участков земли и трудностей доставки сырья к месту потребления в зимне-весенний период.

## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ

Активное вентилирование — перспективный промышленный способ отвода тепла из насыпи сырья. Основные его преимущества:

1. Высокая эффективность в фазе охлаждения сырья.
2. Простота установки.
3. Саморегулирование влажностного режима в основной массе сырья.

Малая относительная влажность приточного воздуха вызывает большую потерю влаги в нижнем слое сырья, но это благоприятно отражается на влажностном режиме в остальной части насыпи. Если относительная влажность приточного воздуха 100%, а сырье обладает хорошей влагоудерживающей способностью, происходит путевое снижение влажности вентилирующего воздуха в массе сырья. В этом случае максимальная естественная убыль может оказаться в средних или верхних слоях насыпи сырья.

Влажность приточного воздуха следует считать оптимальной только в случае, если относительная естественная убыль сырья по высоте насыпи меняется незначительно.

Недостатки активного вентилирования:

1. Пониженная относительная влажность приточного воздуха в конце воздухораспределительных каналов.
2. Избыточное вентилирование нижнего слоя сырья.
3. Невозможность изотермического хранения сырья.
4. Невозможность локального регулирования температуры.

Активное вентилирование осуществляется только в том случае (исключая лечебный период), когда температура воздуха ниже температуры сырья, а так как воздуховоды расположены под насыпью сырья, неизбежен путевой подогрев воздуха в воздуховодах, особенно в начальный, наиболее ответственный период. Следует учесть также подогрев воздуха в вентиляторах.

С достаточной точностью можно написать

$$\varphi_н \omega_н'' = \varphi_п \omega_п'' ,$$

где $\varphi_н$ — относительная влажность воздуха перед вентилятором, доли единицы;
$\omega''_н$ — насыщающая концентрация водяного пара в воздухе перед вентилятором, *кг/м*³;
$\varphi_п$ — относительная влажность приточного воздуха (поступающего в насыпь сырья), доли единицы;
$\omega''_п$ — насыщающая концентрация водяного пара при температуре воздуха, поступающего в насыпь сырья, *кг/м*³.

На основании последнего уравнения и уравнения (24) находим для интервала температур от —2 до +4° С

$$\varphi_п = \frac{\varphi_н (4{,}9 + 0{,}35\, t_н'')}{4{,}9 + 0{,}35\, (t_н'' + \Delta t)} , \qquad (56)$$

где $t''_н$ — температура воздуха перед всасывающим патрубком вентилятора (температура наружного воздуха), °С;
$\Delta t$ — подогрев воздуха за счет теплоотдачи от стенок воздуховода и за счет тепла, эквивалентного работе вентилятора, °С,

$$\Delta t = \Delta t_п + \Delta t_в ,$$

здесь $\Delta t_п$ — путевой подогрев воздуха в воздуховоде, °С;
$\Delta t_в$ — подогрев воздуха в вентиляторе, °С.

На основании критериального уравнения теплоотдачи при установившемся турбулентном режиме, типичном для нагнетательных воздуховодов, нами получена следующая расчетная формула для путевого подогрева воздуха:

$$\Delta t_п = 0{,}007 \frac{l \left(t_{ст} - t_н''\right)}{d_э^{1{,}2}\, w^{0{,}2}} , \qquad (57)$$

где $l$ — расстояние вентилятора от рассматриваемой приточной щели, *м*;
$t_{ст}$ — температура стенок воздуховода (приблизительно равная температуре находящейся на нем насыпи сырья), °С;
$d_э$ — эквивалентный диаметр воздуховода, *м*;
$w$ — скорость воздуха, *м/сек*.

Подогрев воздуха за счет работы вентилятора может быть вычислен по уравнению

$$\Delta t_в = 8 \cdot 10^{-4} \frac{\Delta H}{\eta}, \qquad (58)$$

где $\Delta H$ — напор, развиваемый вентилятором, *н/м²*;
$\eta$ — к. п. д. вентилятора.

Рассмотрим для примера изменение относительной влажности воздуха при активном вентилировании свекловичных кагатов. Принимаем: $l=20$ *м*, $d_э=0{,}7$ *м*, $w=8$ *м/сек*, $t_{ст}-t''_н=4°$ С. По уравнению (57) путевой подогрев воздуха $\Delta t_п=0{,}57°$ С. При поперечных воздуховодах и высоте кагатов до 6 *м* общий напор, развиваемый вентиляторами, составляет в среднем около 170 *н/м²* [170, стр. 305]. Принимаем $\eta=0{,}5$. По уравнению (58) подогрев воздуха в вентиляторе $\Delta t_в=0{,}27°$ С. Общий подогрев воздуха в рассматриваемом примере $\Delta t=0{,}84°$ С. При начальной относительной влажности воздуха $\varphi=90\%$ и начальной температуре $t''_н=0°$ С влажность приточного воздуха $\varphi_п$ по уравнению (56) составит 85%, т. е. на 5% ниже.

Особенно ощутимым оказывается снижение относительной влажности приточного воздуха при использовании низкотемпературного естественного холода в системе пульсирующего охлаждения [183], когда разность температур сырья и вентилирующего воздуха достигает 10—15° С.

Фаза собственно хранения сырья отличается низкой теплонапряженностью, поэтому изотермическое хранение при непрерывном активном вентилировании нецелесообразно вследствие малых перепадов температур, приводимых к высоким влаговыделениям. Обычные удельные расходы вентилирующего воздуха составляют 40—80 *м³/(т·ч)*. При переходе к собственно хранению их рекомендуют снижать в 3—4 раза [173]. Для расчета принимаем $20\ м^3/(т \cdot ч)$, или $V=5{,}6 \cdot 10^{-6}$ *м³/(кг·сек)*. Найдем требуемый перепад температур при следующих условиях: удельная поверхность сырья $F=0{,}2$ *м²/кг*, теплота дыхания при 0° С $q_0=0{,}01$ *вт/кг*, энтальпийный коэффициент $\xi=1{,}7$. Из уравнения $q=\alpha\xi F\Delta t$ перепад температур 0,01° С. Пусть температура воздуха составляет $t_с=0°$ и относительная влажность $\varphi=0{,}96$. При этих условиях на основании уравнений (23) и (24) отношение потенциалов переноса тепла и влаги $M=50$ *град/(м³·кг)*. По уравнению (28) при $\varepsilon_F=0{,}3$ потери влаги за 5 месяцев $n_х=4{,}8\%$, а по уравнению (26) $n_{хк}=5{,}2\%$, т. е. отвод тепла при указанных условиях будет происходить почти полностью за счет испарительного охлаждения.

Значительное при активном вентилировании увядание сырья со слабой влагоудерживающей способностью (капуста, морковь) в первую очередь в нижней части насыпи вызывает деформацию его, сопровождающуюся уменьшением скважитости, что может служить причиной больших потерь. В одном из опытов в сезоне 1967/68 г. на холодильнике Одесской торгово-закупочной базы

«Торгмортранс» в закроме с капустой при непрерывном активном вентилировании воздухом с температурой около 0° С и относительной влажностью 88—94% усадка при первоначальной высоте 2 *м* составила 0,55 *м*, т. е. скважистость к концу хранения уменьшилась на 28%. Отходы составили 26,4%.

При малых расходах вентилирующего воздуха [20—40 $м^3/(т \cdot ч)$] происходит послойное охлаждение сырья: в начале процесса на расстоянии 10—20% общей высоты штабеля (насыпи) воздух теряет свою охлаждающую способность и в верхних слоях насыщается влагой, т. е. возникает вредное (избыточное) вентилирование верхнего слоя. К концу охлаждения избыточному вентилированию подвергается нижний слой сырья, причем потери влаги оказываются особенно ощутимыми при малой относительной влажности приточного воздуха.

В практике хранения тепло дыхания при активном вентилировании отводится периодически, и это правильно. Приходится мириться с неизотермичностью режима хранения и неравномерностью температурного поля, особенно возрастающей к концу периода стоянки вентиляторов. Колебания температуры для некоторых видов сырья (например, моркови) крайне нежелательны, для сырья с малыми массообменными характеристиками они в узком интервале допустимы.

Одним из недостатков активного вентилирования является невозможность локального регулирования температуры в разных местах хранилища. Включение вентиляторов производится автоматически для всего хранилища с помощью полупроводникового терморегулятора ПТРД-2 [102] или прибора РТМ-1 [170], причем датчик температуры устанавливается в каком-либо одном месте. Различные темпы самосогревания сырья в разных местах хранилища не учитываются, поэтому неизбежны неравномерность температурного поля и избыточное вентилирование.

Рассмотрим некоторые факты и данные из практики хранения сырья. В ряде работ [2, 21, 23] отмечается положительный опыт активного вентилирования сырья при размещении его навалом. Многие исследователи отмечают большую естественную убыль сырья внизу насыпи — со стороны входа вентилирующего воздуха, что подтверждает сделанный выше вывод. Например, в опытах И. Л. Волкинда, Г. Ф. Шуметова, Н. С. Дашкина и В. П. Острокопытова [29] потери в весе при хранении моркови были: внизу (на 0,3 *м* от решетчатого пола) 8,0%, вверху (на таком же расстоянии от верха) 6,3%; при хранении капусты — соответственно 10,0 и 6,2%.

Ю. Г. Скорикова [120] отмечает высокие потери моркови и массовое прорастание ее при активном вентилировании в закромах наружным воздухом в условиях Северного Кавказа. Особенно большой была естественная убыль в нижней части закромов.

Не рекомендуется [2] значительно увеличивать высоту загрузки капусты в хранилище, так как это приводит к необходимости по-

вышать количество подаваемого воздуха, что увеличивает естественную убыль в нижнем слое капусты, ее увядание и деформацию из-за увеличения давления на нижний слой.

В литературе нередко встречаются рекомендации уменьшать производительность вентиляторов в зимний период путем частичного перекрытия воздуховодов шиберами. Этого делать нельзя, так как уменьшение расхода воздуха при практически неизменной потребляемой мощности приводит к резкому снижению относительной влажности. Л. В. Метлицкий [103] сообщает, что наружные листья на кочанах в нижних слоях заметно увядали в результате влияния сухого воздуха активной вентиляции. Влажность подаваемого в хранилище воздуха не регулировалась и колебалась от 85 до 90%. Максимальная высота загрузки 2,5 *м*; при большей высоте наблюдалась деформация кочанов внизу.

Волосов Ю. В. [33] отмечает, что понижающаяся при вентилировании относительная влажность воздуха в межклубневом пространстве восстанавливается через 6—8 *ч* после окончания вентилирования. При естественной вентиляции образуется несколько больший слой субернизированных клеток, что можно объяснить некоторым уменьшением влажности воздуха при активном вентилировании.

Г. Шуметов [187] указывает, что убыль массы при активном вентилировании происходит главным образом за счет воды, при естественном вентилировании — за счет сухих веществ.

В средней полосе и северных районах страны активное вентилирование дает удовлетворительные результаты [2, 24, 102, 125], в частности, при хранении картофеля в буртах [161], однако это не исключает необходимости совершенствования его и применения в сочетании с испарительным охлаждением и увлажнением воздуха в таких районах, как УССР, Кубань, Молдавия и в более южных районах с сухим и жарким климатом.

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ СХЕМ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ

В поперечных схемах применяются осевые вентиляторы, подающие воздух в кагаты через поперечные подземные каналы с выходными отверстиями в верхней части. В продольных схемах вдоль всего кагата идет один общий подземный воздуховод с отверстиями вверху [170].

Анализ формул (56)—(58) вскрывает органические и весьма серьезные недостатки продольных схем активного вентилирования свекловичных кагатов. Как видно из уравнения (57), путевой подогрев воздуха в воздуховодах прямо пропорционален их длине, а уравнение (58) показывает, что типичное для продольных схем увеличение общего напора усиливает отрицательное влияние работы вентилятора на влажность воздуха.

Большие сопротивления заставляют применять в продольных схемах вместо осевых центробежные вентиляторы со средним напором около 2000 *н/м*$^2$ [170]. Принимаем для расчета в продольной схеме: $l=50$ *м*, $\Delta H=2000$ *н/м*$^2$, $\eta=0{,}7$; остальные условия те же, что в предыдущем примере (стр. 111). По уравнению (57) путевой подогрев воздуха $\Delta t_{\text{п}}=1{,}4^\circ$ С, по уравнению (58) подогрев воздуха в вентиляторе $\Delta t_{\text{в}}=3{,}2^\circ$ С. Общий подогрев воздуха $\Delta t=4{,}6^\circ$ С. Относительная влажность приточного воздуха $\varphi_{\text{п}}$ (при начальной 90%) по уравнению (56) составляет 67,8%.

Проведенный анализ подтверждает бесспорные преимущества поперечной системы вентилирования кагатов.

Опыты, поставленные в Канаде, показали, что при поперечных воздуховодах потери сахара в 2 раза меньше, чем при продольном расположении воздуховодов [143].

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИКИ ХРАНЕНИЯ ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ

Изложенное выше позволяет сформулировать следующие основные рекомендации по совершенствованию техники промышленного хранения сочного растительного сырья:

1. Учитывая особенность активного вентилирования — путевое снижение относительной влажности воздуха на участке от всасывающих патрубков вентиляторов до крайних приточных отверстий воздухораспределительных каналов, — при хранении сырья со слабой влагоудерживающей способностью необходимо предусматривать путевое увлажнение воздуха в самих воздуховодах, сопровождаемое полезным испарительным охлаждением.

2. В хранилищах, оборудованных системами активного вентилирования, не следует допускать непрерывной работы вентиляторов.

3. В хранилищах с машинным охлаждением необходимо применять две независимые охлаждающие системы: внешнюю (для защиты сырья от внешних теплопритоков) и внутреннюю (для отвода физического и физиологического тепла, выделяемого сырьем). Последняя должна выполняться как система активного вентилирования сырья, хранящегося навалом или в таре, причем следует предусматривать увлажнение воздуха перед поступлением его в насыпь сырья. (Исключение составляет первый период хранения сырья, покрытого капельножидкой влагой, а также сырье с высокой влагоудерживающей способностью).

4. При использовании искусственного холода эффективным может оказаться гравитационное вентилирование, обеспечивающее стабильный влажностный режим и изотермическое хранение.

5. В южных районах с сухим климатом при отсутствии хранилищ с машинным охлаждением необходимо широко использовать одно- и двухступенчатое испарительное охлаждение наружного воздуха.

Первая рекомендация достаточно обоснована выше. Она относится к здоровому сырью с нормальным тургором. Для картофеля, уложенного влажным, увлажнения воздуха в лечебный период не требуется до окончания сушки.

Активное вентилирование при использовании искусственного холода целесообразно, о чем свидетельствует зарубежный опыт [97, 203]. Во многих холодильниках Дании и северной части ФРГ для охлаждения и увлажнения воздуха применяются башенные воздухоохладители. Воздух из верхней части камеры забирается вентилятором и, проходя последовательно воздухоохладитель, а затем увлажнитель, поступает в пространство под грузами и через решетчатый пол входит в грузовой объем камеры. Не испарившаяся вода стекает через отверстия в полу. Здесь сочетается активное вентилирование с подачей воздуха снизу, т. е. токи свободного и вынужденного движения воздуха совпадают и это предупреждает отпотевание сырья. Между штабелями из плотно установленной планчатой тары и стенами хранилища имеется зазор, через который подается холодный воздух. Это снижает вредное влияние внешних теплопритоков.

При активном вентилировании затаренного сырья необходимо применение планчатой тары и плотная укладка ее. Г. Л. Басин [11] описывает успешный опыт эксплуатации в Болгарии хранилищ контейнерного типа с применением принципа активного вентилирования.

Крупным недостатком существующих охлаждающих систем фруктохранилищ является отсутствие защиты сырья от внешних теплопритоков. Фруктовые холодильники строятся прежде всего в районах с высокой расчетной температурой наружного воздуха. Большие внешние теплопритоки приводят к снижению равновесной относительной влажности воздуха в камерах. По данным А. А. Гоголина [121], тепловлажностные характеристики процессов изменения состояния воздуха в камерах фруктового холодильника в условиях юга УССР колеблются в пределах от $11{,}5 \cdot 10^6$ до $22{,}0 \cdot 10^6$ *дж/кг*, что превышает оптимальное значение в 1,8—3,3 раза. Для «перехвата» внешних теплопритоков в опытном фруктохранилище рассольные батареи располагались в панелях стен, пола, потолка [39].

Несколько лет назад секцией пищевой технологии Национального исследовательского совета биологических наук Канады были успешно проведены в промышленном масштабе опыты по хранению овощей в камерах с высокой относительной влажностью воздуха (для моркови почти 100%). Хранилища имели двойные стены, в пространстве между которыми циркулировал холодный воздух. Совершенствование техники хранения ценных видов сырья с применением искусственного холода позволит эффективнее использовать холодильное оборудование и продлить срок потребления этих видов сырья. В настоящее время около 80% годового потребления фруктов приходится на летне-осенний период [19].

Испытания системы одноступенчатого испарительного охлаждения, проведенные в шт. Нью-Джерси и на юго-востоке шт. Пенсильвания (США), где в начале сентября максимальная дневная температура по сухому термометру равна 23,9° С, а по мокрому 15° С, показали, что средняя температура в хранилище при активном вентилировании без испарительного охлаждения равнялась 21,1° С, а при испарительном охлаждении была не выше 15,5° С при относительной влажности воздуха 85—90% [105]. Таким образом, в определенных климатических условиях применение испарительного охлаждения позволяет снизить температуру на 5—8° С и повысить относительную влажность воздуха до нужных пределов.

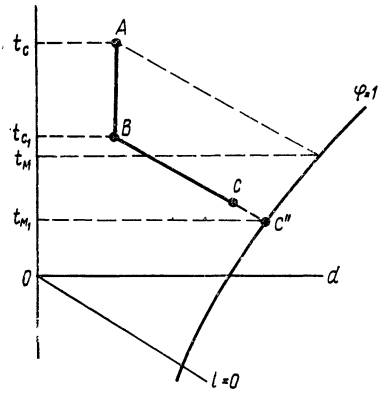



Рис. 8. Двухступенчатое испарительное охлаждение воздуха:
*AB* — косвенное испарительное охлаждение; *BC* — прямое испарительное охлаждение

При относительной влажности воздуха ниже 30% двухступенчатое испарительное охлаждение может обеспечить снижение температуры на 10—14° С: на первой ступени воздух охлаждается в поверхностном воздухоохладителе водой из градирни, на второй осуществляется адиабатическое увлажнение воздуха рециркулирующей водой. На рис. 8 приводится построенная в *d*—*i*-диаграмме схема двухступенчатого испарительного охлаждения воздуха.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Чем выше тургор живой растительной ткани, тем меньше вреда приносит капельножидкая влага, попадающая на сырье. Доказательством этого служит успешное хранение сырья в ледяных складах Крылова, траншеях со снегованием, упаковках из полимерных материалов. Защита сырья от потерь влаги — основное требование, предъявляемое к технике уборки, транспортировки и хранения сырья.

2. Правильная сравнительная оценка различных способов хранения сочного растительного сырья невозможна без сопоставления условий отвода тепла и влаги. Этот критерий должен быть положен в основу классификации способов хранения.

3. Минимальные потери влаги и хорошие результаты хранения обеспечиваются в том случае, когда преобладающую роль при отводе тепла играет теплопроводность.

4. Конвективный теплообмен неизбежно сопровождается влагообменом, поэтому использование воздуха как холодоносителя да-

леко не лучший способ отвода тепла. Его распространение объясняется простотой реализации.

5. Процессы отвода физического и физиологического тепла различны как по теплонапряженности, так и по продолжительности. С целью уменьшения потерь влаги сырьем эти процессы целесообразно проводить раздельно.

6. Главные преимущества активного вентилирования — защита основной массы сырья от вредного влияния внешних теплопритоков, саморегулирование влажностного режима и благоприятные условия в фазе охлаждения сырья.

7. Непрерывная работа вентиляторов в фазе собственно хранения недопустима, так как отвод физиологического тепла при этом сопровождается большими потерями влаги из-за малых перепадов температур.

8. Активное вентилирование, осуществляемое только в том случае, когда температура воздуха ниже температуры сырья, всегда сопровождается путевым понижением влажности воздуха в подполье хранилищ или в воздуховодах, находящихся в тепловом контакте с насыпью сырья и грунтом, а также в вентиляторах.

Пониженная влажность приточного воздуха — органический недостаток активного вентилирования, который проявляется прежде всего при хранении сырья со слабой влагоудерживающей способностью. Для этого сырья характерна большая естественная убыль в нижнем слое насыпи (со стороны входа воздуха). Указанное явление усиливается при частичном перекрытии воздуховодов, практикуемом в холодное время года.

Увядание сырья в нижнем, наиболее нагруженном слое иногда сопровождается его деформацией и уменьшением скважистости, что может приводить к большим потерям.

9. Уменьшение скважистости, нарушающее нормальные условия аэрации, часто наблюдается при хранении сахарной свеклы в годы с неустойчивой погодой в зимний период. Оно вызывается многократным замораживанием и оттайкой корней, что приводит к их деформации и усадке насыпи. Указанное явление усиливается с увеличением температуропроводности насыпи по мере уменьшения ее скважистости.

10. Для продольных схем активного вентилирования свекловичных кагатов типичны значительный путевой подогрев воздуха и понижение его относительной влажности в воздуховодах и центробежных вентиляторах, поэтому указанные схемы не могут быть рекомендованы для внедрения.

11. Вентилирование сырья, не сопровождающееся полезным отводом тепла (избыточное вентилирование), приводит к повышенным потерям. Избыточное вентилирование неизбежно при хранении корнеплодов и затрагивает в основном их хвостовую часть. Оно часто возникает в конце фазы охлаждения. Стремление максимально приблизить температуру сырья к температуре охлаждающего воздуха приводит к большим потерям влаги, так как избы-

точное вентилирование в этом случае протекает при весьма малых перепадах температур.

12. Чем выше влагоудерживающая способность сырья, тем значительнее влияние перепада температур и относительной влажности воздуха на влаговыделения.

13. При совершенствовании техники хранения сочного растительного сырья могут оказаться полезными следующие рекомендации:

а) предварительное охлаждение сырья методом активного вентилирования или гидравлическим способом;

б) защита сырья со слабой влагоудерживающей способностью от вредного влияния тепла грунта и тепла, эквивалентного работе вентиляторов, путем испарительного охлаждения и увлажнения воздуха — непосредственно в воздуховодах или в подпольях хранилищ;

в) защита сырья в южных районах страны от вредного влияния внешних теплопритоков путем применения двух независимых охлаждающих систем: для отвода внешнего и внутреннего тепла;

г) широкое использование в районах с сухим и жарким климатом одно- и двухступенчатого испарительного охлаждения;

д) увеличение перепада температур на границе сырье — воздух в системах активного вентилирования.

# ГЛАВА V

# КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА ПРИ ХРАНЕНИИ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ СЫРЬЯ

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ ХРАНЕНИЯ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

### Прямоточно-рециркуляционная система активного вентилирования свекловичных кагатов

Преобладающим способом хранения сахарной свеклы в настоящее время является хранение ее в сравнительно узких (шириной до 15 *м*) и невысоких (4—5 *м*) кагатах, которые подвергаются ветровому и отчасти гравитационному вентилированию. Результаты хранения свеклы в таких кагатах зависят от их расположения и климатических условий. Расположение кагатов длинной стороной к господствующему направлению ветра благоприятно отражается на результатах хранения свеклы. Это объясняется тем, что ветреная погода бывает, как правило, при высокой влажности воздуха (перед осадками). Ветровое вентилирование кагатов влажным воздухом целесообразно. В подавляющем большинстве случаев хранение свеклы в кагатах без активного вентилирования сопровождается повышенными потерями.

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте сахарной промышленности под руководством М. З. Хелемского [170] за последние 10 лет многое сделано по внедрению в сахарную промышленность системы активного вентилирования свекловичных кагатов.

Одним из недостатков активного вентилирования является невозможность влиять на микроклимат в кагатах с наступлением морозов. Известно, что при неустойчивой погоде в зимний период подмораживание и оттаивание свеклы служат главной причиной образования очагов поражения, чему способствуют недостаточно совершенные укрывочные материалы, в качестве которых применяются, главным образом, камышитовые щиты [170].

Способ эффективной защиты свеклы от подмораживания и оттаивания, предложенный Жаданом В. З., Хелемским М. З. и Мовчаном А. А. (авторское свидетельство № 171681 от 29 марта 1965 г.) основан на использовании выделяемого при хранении физиологического тепла для подвода к периферийному слою кагатов.

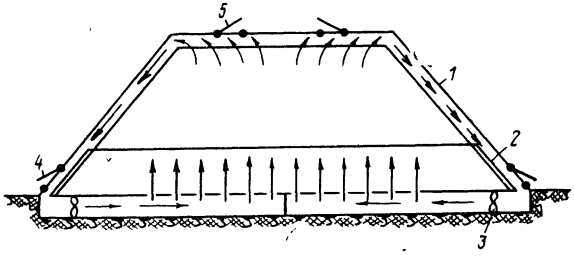



Рис. 9. Схема прямоточно-рециркуляционного вентилирования свекловичного кагата.

Принципиальная схема прямоточно-рециркуляционной системы вентилирования, реализующая эту идею, показана на рис. 9. Кагат укрывался воздухонепроницаемым материалом *1* (чехол из прорезиненной саржи) по всей поверхности. Для образования воздушного зазора на свеклу предварительно укладывались деревянные каркасы, а на них камышитовые щиты (на рисунке не показаны). Нижняя часть кагата на $^1/_3$ высоты покрывалась воздухонепроницаемым материалом *2*, который непосредственно соприкасался со свеклой. Движение воздуха обеспечивалось осевыми вентиляторами *3*. В первый период производилось прямоточное вентилирование кагата в наиболее холодное время суток (в предутренние часы) при открытых клапанах *4* и *5*. С наступлением морозов периодическое рециркуляционное вентилирование при закрытых клапанах обеспечивало следующие одновременно протекающие полезные теплофизические процессы.

1. Отвод тепла дыхания от центральных слоев свеклы, что предупреждало ее самосогревание.

2. Защита периферийного слоя свеклы от подмораживания теплом дыхания свеклы.

3. Поддержание высокой относительной влажности приточного воздуха. Это обеспечивалось тем, что воздух, покидающий зарубашечное пространство кагата, образуемое воздухонепроницаемыми укрытиями *1* и *2*, соприкасался с влажной поверхностью *1*, имеющей температуру ниже точки росы.

В крупных кагатах удельная поверхность составляет около 0,5 $м^2/т$. Теплота дыхания сахарной свеклы $q$ при температуре 1,5° С составляет 9,3 *вт/т*. Коэффициент теплопередачи укрытия (камышитовых щитов и воздушной прослойки) $K=1{,}16$ $вт/(м^2 \times \times град)$. Как показывает расчет, снижение температуры свеклы с 1,5° С до безопасного предела —1,0° С продолжается 11,6 суток. В условиях Кировоградской области устойчивые морозы с температурами —15° С продолжаются не более 12 суток. Таким образом, рециркуляция кагатного воздуха обеспечивает хранение сахарной свеклы в свежем виде (без подмораживания) даже в том случае, если применяются малоэффективные теплоизоляционные укрытия. Впервые указанная система была проверена в сезоне 1964/65 г. на 2-м им. Петровского сахарном заводе Кировоградского свеклосахаротреста на двух кагатах, в одном из которых был использован искусственный холод.

Кагат № 1 с искусственным охлаждением имел емкость 583 *т*. Оборудование: аммиачный холодильный агрегат марки АКУ 40/30 с удельной холодопроизводительностью 0,08 *вт/кг*; 5 центробежных вентиляторов марки ЭВР-5, которые нагнетали воздух через ребристые воздухоохладители с поверхностью 34,7 $м^2$ каждый в воздушные каналы, расположенные под кагатом. Воздух поступал в слой свеклы через щели в верхней стенке каналов.

В нижней части воздухонепроницаемого укрытия было сделано 5 отверстий, через которые воздушный продух под укрытием соединялся с помощью воздуховодов из оцинкованного железа со всасывающими патрубками вентиляторов для рециркуляции кагатного воздуха. Была предусмотрена также возможность подсоса свежего воздуха и работа при прямоточном вентилировании.

Температура воздуха в кагате на протяжении почти всего периода хранения поддерживалась на уровне от 0 до +2° С, относительная влажность воздуха составляла 85—90%, содержание углекислого газа не превышало 0,5%. Температуру измеряли хромель-копелевыми термопарами, влажность кагатного воздуха — гигрографами с недельным заводом, закладывавшимися в шахты с перфорированными стенками, а также с помощью пробоотборника, отсасывавшего воздух через предварительно заложенные в свеклу стальные трубы и пропускавшего его через психрометрическое устройство.

При температуре наружного воздуха от —1,5 до 0° С вентиляторы в опытном кагате работали по прямоточной системе с удельным расходом воздуха 50 $м^3/ч$ на 1 *т* свеклы. В период устойчивых

морозов — при температуре наружного воздуха ниже —1,5° С — вентилирование опытного кагата осуществлялось по рециркуляционной системе с подсосом небольшого (до 10%) количества свежего воздуха при общем удельном расходе воздуха около 40 $м^3/ч$ на 1 $т$ свеклы. При этом воздух, подаваемый вентиляторами через нагнетательные воздуховоды, проходил снизу вверх через толщу свеклы, воспринимал тепло дыхания и попадал в воздушный продух под укрытием. В продухе воздух, двигаясь сверху вниз к всасывающим воздуховодам, омывал всю наружную поверхность свеклы. Таким образом в период морозов предотвращалось подмораживание корней периферийных слоев и обеспечивалось выравнивание температуры в кагате.

Холодильный компрессор включался при повышенной температуре наружного воздуха. За весь период хранения свеклы вентиляторы в опытном кагате работали 30%, холодильный компрессор — 19% времени.

В кагате № 2 с прямоточно-рециркуляционной системой вентилирования использовался естественный холод. Емкость кагата 541 $т$. Он был оборудован 5 осевыми вентиляторами марки МЦ-7. Удельный расход воздуха около 50 $м^3/(т \cdot ч)$. Температура свеклы колебалась в пределах от 0 до 5° С.

Таблица 26

| Показатель | Кагаты | |
|---|---|---|
| | № 1 | № 2 |
| Средняя дигестия свеклы при укладке, % | 19,2 | 18,3 |
| Продолжительность хранения, сутки | 128 | 125 |
| Количество корней, % | | |
| с поверхностной плесенью | 25,0 | 21,0 |
| загнивших | 14,2 | 12,5 |
| Гнилая масса, % | 0,71 | 0,71 |
| Среднесуточные потери сахара, % к начальной массе свеклы | | |
| фактические | 0,0090 | 0,0074 |
| по норме | 0,0124 | 0,0124 |
| Сбережено сахара, $кг$ | 2655 | 3370 |

Результаты хранения свеклы в кагатах № 1 и 2 приведены в табл. 26. Подмороженных корней не было. Проросших корней также не было. Из табл. 26 видно, что, несмотря на применение дорогостоящего искусственного холода, результаты хранения свеклы в кагате № 1 оказались ниже, чем в кагате № 2. Причина заключалась в более низкой равновесной влажности воздуха в кага-

те № 1, оборудованном центробежными вентиляторами. Воздухоохладители с навивными ребрами создавали большое сопротивление, которое приводило к нагреванию воздуха на 0,6—0,8° С и снижению его относительной влажности.

Опыт на 2-м им. Петровского сахарном заводе оказался поучительным. Он подтвердил важность высокой относительной влажности воздуха при хранении сахарной свеклы.

В следующем производственном сезоне опыт с использованием искусственного холода был повторен. Воздухонепроницаемые укрытия в первом сезоне при разборке кагатов в морозную погоду были повреждены, так как примерзли к деревянным каркасам. Из двух чехлов едва удалось получить один. Контрольными для кагата № 1 были кагаты № 2 с прямоточной системой вентилирования и № 3 без вентилирования.

Емкость каждого из трех кагатов составляла 650 *т*. Размеры кагатов: длина 24 *м*, ширина 16 *м*, высота 6 *м*. Для кагата № 2 число дней с дождливой и туманной погодой и повышенной влажностью наружного воздуха за период хранения составило 45%, число дней с температурой наружного воздуха ниже 0° С — 38%, поэтому вентиляторы на кагате № 2 работали всего 5% времени хранения.

Сезон 1965/66 г. отличался крайне неустойчивой погодой: в период с 14 по 19 ноября произошло резкое снижение температуры до —15° С, но 23 ноября температура наружного воздуха поднялась до +4° С, после этого было еще четыре похолодания (температура снижалась до —18° С) с последующими потеплениями. Неблагоприятные погодные условия, подмораживание и оттаивание части свеклы в контрольных кагатах послужили причиной образования массовых очагов поражения. Температура свеклы в очагах поражения достигала 40° С. Общее количество гнилой массы, удаленной из очагов поражения в контрольном кагате № 2, составило 8,5%.

Осмотр этого кагата при заборе свеклы показал, что наибольшее количество гнилой массы было над глухой частью воздуховодов, т. е. на начальном участке их длиной около 3 *м*, на котором не было отверстий. По-видимому, резкое и частое изменение температуры наружного воздуха вызывало подмораживание и оттаивание свеклы благодаря теплопередаче через стенки воздуховодов, несмотря на то что они закрывались в период морозов и утеплялись двумя слоями камышитовых щитов.

Во втором контрольном кагате (кагате № 3) количество гнилой массы, извлеченной из очагов поражения, составило 4,3%.

Помимо этого, подмороженных и оттаявших корней с почерневшей тканью оказалось: в контрольном кагате с активным вентилированием 26,4%, в контрольном кагате без вентилирования 26,9%. Проросших корней было соответственно 3,7 и 4,9%.

В основном опытном кагате очагов поражения, а также подмороженных и проросших корней не было.

При переработке свеклы из опытного и контрольного кагатов технологические показатели по опытному кагату оказались значительно более благоприятными: брак стружки в 3,4 раза меньше, чем для свеклы из контрольных кагатов; длина стружки на 12,5% больше, чем для свеклы из контрольных кагатов; доброкачественность диффузионного сока на 3,9 единицы выше. Потери сахара в опытном кагате № 1 оказались в 4,4 раза ниже, чем в кагате № 2, и в 3,6 раза ниже, чем в кагате № 3.

Высокие результаты хранения в кагате № 1 объясняются предотвращением подмораживания корней благодаря рециркуляционному вентилированию.

Большие потери при хранении сахарной свеклы в годы с неустойчивой погодой отмечаются и в странах западной Европы. В производственном сезоне 1956/57 г. в Западной Германии в начале декабря 1956 г. после сильных морозов наступило резкое потепление. Это вызвало почти на всех заводах трудности при переработке свеклы и большие потери. На оттаявшей свекле появились очаги гнили и выделения слизи [189].

Защита свеклы от термического травмирования (подмораживания и оттаивания) дает значительно больше, чем использование искусственного холода, хотя за рубежом некоторые крупные специалисты, такие, как Вайна, считают искусственный холод перспективным при хранении сахарной свеклы [217].

Наш многолетний опыт показал, что целесообразное использование природных ресурсов и, в частности, кондиционирование воздуха по влажности открывает широкие возможности совершенствования техники хранения сахарной свеклы при минимальных затратах.

## Хранение сахарной свеклы при кондиционировании приточного воздуха по влажности

Общие потери при хранении сахарной свеклы определяются интенсивностью биохимических, физиологических и микробиологических процессов. Решающее значение имеют микробиологические процессы. Особенностью этих процессов является то обстоятельство, что общие потери сахара, вызываемые ими, складываются из потерь при хранении и дополнительных потерь в производстве, вызываемых отрицательным влиянием гнилой массы на технологические качества свеклы.

Учитывая решающее влияние тургора свекловичных корней на потери, в сезоне 1966/67 г. на Маковском сахарном заводе Хмельницкого свеклосахаротреста нами совместно с М. З. Хелемским впервые был поставлен опыт увлажнения вентилирующего воздуха при тонком распылении воды в воздуховодах и полном усвоении ее воздухом в кагате емкостью 2021 *т*. Контрольный кагат емкостью 2115 *т* отличался только отсутствием увлажнительной

установки. Укрытие обоих кагатов — камышитовые маты в один слой. Продолжительность хранения 89 суток.

Е. П. Широков [2] убедительно показывает роль высокой влажности вентилирующего воздуха в первый, теплый период хранения как профилактического средства, предотвращающего ослабление сырья из-за увядания. Кислород обеспечивает лучшее опробковение — суберинизацию мест повреждения ткани, но при этом важно поддерживать на определенном уровне влажность, так как в противном случае подсохший слой может легко отвалиться от мест повреждения [139]. Работами Чехословацкого научно-исследовательского института сахарной промышленности установлено, что в годы с сухой осенью свекла хранится хуже, что безусловно связано с потерей воды и уборкой увядшей свеклы [217].

Опыты показали значительно большую естественную убыль дуплистых корней за счет потери влаги, а чем больше степень увядания корней, тем интенсивнее происходит развитие гнили [55]. Большой интерес представляют результаты анализа 3600 гнилых корней свеклы, которые приводит С. Ф. Морочковский [113]:

| | |
|---|---|
| Надрезы орудиями копки | 20,4% |
| Рваные раны | 35,0% |
| Дуплистость | 28,9% |
| Увядание | 10,2% |

Существенное значение имеет характер травмирования ткани. М. Мосин и В. Толонилов [112] установили, что последствия механического травмирования зависят от микробиологической обсемененности орудий травмирования (рабочих органов комбайнов и буртоукладочных машин).

Эти данные подтверждают решающую роль влажностного режима в первый период хранения свеклы: травмированные и дуплистые корни быстро теряют влагу и иммунитет к микробиологическому поражению. При низкой влажности ненормально протекают раневые реакции. Л. В. Метлицкий и Е. П. Мухин [104] подчеркивают, что при температуре ниже 5° С отложение суберина проходит очень медленно, перидерма вообще не образуется. Относительная влажность воздуха менее 70% также резко замедляет синтез суберина и исключает появление перидермальных клеток.

Таким образом, правильное проведение первого, наиболее ответственного (лечебного) периода играет профилактическую роль: от того, насколько удастся сократить потери влаги травмированными корнями (для участков травмирования $\varepsilon_F=1$) и обеспечить эффективное заживление ран, зависит успех последующего хранения свеклы.

На Маковском сахарном заводе количество травмированных корней превышало 35%. Особенно много корней было с обломанными хвостиками. Для проверки эффективности увлажнения вен-

тилирующего воздуха сопоставлялись результаты хранения свеклы в опытном и контрольном кагатах.

Коэффициент эффективности увлажнительной установки определялся путем деления действительного приращения влагосодержания воздуха на предельное теоретически допустимое приращение указанной величины. Численные значения влагосодержания воздуха замерялись с помощью психрометра Ассмана, причем последний устанавливался в одно и то же время перед вентилятором и в воздуховоде (вводился через щель на глубину $^4/_5$ длины прибора) на расстоянии 11—12 *м* от форсунки — в месте, где в потоке воздуха отсутствовали капли воды.

Применялись прямоточные форсунки с винтовыми вкладышами. С помощью прокладки и латунной накидной гайки форсунка герметически соединялась со стальной трубой диаметром 12 *мм*. Так как применялись форсунки тонкого распыла воды с диаметром выходного отверстия 1 *мм*, перед каждой форсункой устанавливались цилиндрические фильтры из мелкой латунной сетки, которые благодаря большой рабочей поверхности надежно предотвращали засорение форсунок. Устанавливался также центральный бутылочный фильтр в водозаборном баке. В конце сезона после демонтажа форсунок было установлено, что ни одна из них не вышла из строя.

Форсунки *5* (рис. 10) располагались в нагнетательных воздуховодах на расстоянии 1,2 *м* от лопастей вентилятора факелом навстречу потоку воздуха. Каждая форсунка присоединялась к ма-

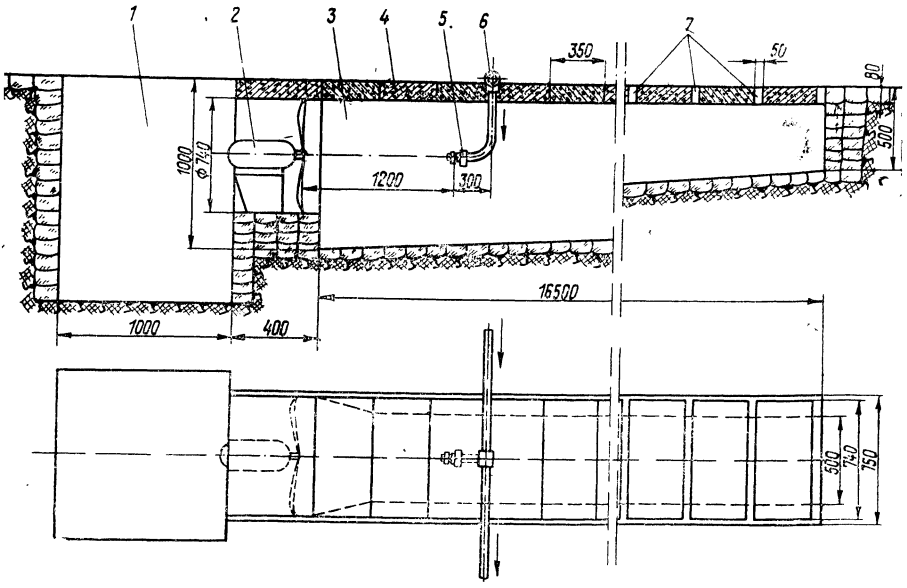



Рис. 10. Увлажнение вентилирующего воздуха.

гистральному водяному трубопроводу *6* диаметром 12 *мм*. Воздух поступал в приямок *1* и с помощью вентилятора *2* подавался в воздуховод *3*. Длина глухой части нагнетательного воздуховода, перекрытого железобетонными плитами *4*, составляла 6 *м*, после чего начинался участок, перекрытый плитами с воздухораспределительными зазорами *7* шириной 50 *мм*.

До укладки свеклы было установлено, что при максимальном напоре вода на электродвигатели не попадает и уноса ее в слой свеклы не происходит (хотя последнего при хорошем тургоре свеклы не следует опасаться).

До укладки свеклы был определен коэффициент эффективности результативного процесса *BD* (рис. 11) по формуле

$$\eta = \frac{d_2 - d_1}{d_2'' - d_1},$$

где $d_1$ — начальное влагосодержание воздуха (до увлажнения);
$d_2$ — влагосодержание приточного воздуха (в точке $D$);
$d''_2$ — предельное теоретически возможное влагосодержание воздуха (при $\varphi = 100\%$ и той же температуре).

Указанная величина при напоре воды $3 \cdot 10^5$ *н/м*$^2$ составила 0,38.

Укладка кагата производилась в период с 21 по 28 октября. Увлажнительная установка начала работать уже на второй день — после укладки 25% свеклы. Вентиляторы с увлажнительными устройствами включались по мере укладки кагата, т. е. к концу укладки работали все вентиляторы и увлажнительные форсунки.

Вентиляторы были сблокированы с насосами: включение последних было невозможным без предварительного включения вентиляторов, чем предотвращалось попадание воды на электродвигатели вентиляторов.

Общее число часов работы вентиляторов на опытном кагате за 89 суток составило 556, из них увлажнительная установка работала 72 *ч*, что составляет 3,4% по отношению ко всему периоду хранения и 13% к периоду работы вентиляторов.

Увлажнение воздуха дало хорошие результаты: среднесуточные потери сахара составили в опытном кагате 0,0039% к массе свеклы, в контрольном — 0,0115%, гнилая масса — соответственно 0,15 и 0,46%.

При испытании увлажнительной установки до укладки свеклы было установлено, что стенки нагнетательных воздуховодов на участке 6—10 *м* увлажнялись (покрывались пленкой воды), что создавало дополнительную поверхность испарения и защищало свеклу от вредного влияния тепла грунта и самой свеклы.

В табл. 27 приводятся основные показатели по результатам хранения свеклы с увлажнением вентилирующего воздуха.

Как видно из таблицы, потери сахара и количество гнилой массы в опытном кагате оказались в 3 раза меньше, чем в кон-

Таблица 27

| Показатель | Опытный кагат № 36 с увлажнением воздуха | Контрольный кагат № 28 |
|---|---|---|
| Дигестия свеклы, % . . . . . | 18,23 | 18,81 |
| Количество корней, % | | |
| загнивших . . . . . | 0,50 | 4,90 |
| подмороженных . . . . . | 10,3 | 18,0 |
| Содержание гнилой массы, % . . . | 0,15 | 0,46 |
| Удалено свеклы в период хранения из очагов поражения, *т* . . . . . | — | 136 |
| То же, % . . . . . | — | 6,43 |
| Среднесуточные потери сахара, % к массе свеклы . . . . . | 0,0039 | 0,0115 |

трольном. Обращает на себя внимание меньшее почти в 1,8 раза количество подмороженных корней в опытном кагате. По-видимому, высокий тургор растительной ткани способствует ее переохлаждению.

Как показали расчеты, дополнительные затраты на увлажнительную установку составляют около 3% к капиталовложениям на вентиляторную установку (включая воздуховоды).

Эксплуатационные расходы при увлажнении вентилирующего воздуха возрастают всего на 2,5% по сравнению с эксплуатационными расходами при активном вентилировании. Капиталовложения окупаются менее чем за 0,1 года.

Опыты, проведенные в сезоне 1967/68 г. на Засельском и Котовском сахарных заводах Одесского свеклосахаротреста, показали, что даже в тяжелых климатических условиях юга УССР увлажнение вентилирующего воздуха предотвращает образование очагов поражения в кагатах и позволяет снизить среднесуточные потери сахара при хранении свеклы в 1,8—2,5 раза.

Особенно показательными оказались опыты на Засельском сахарном заводе, где хранилась отличающаяся пониженной лежкоспособностью дуплистая поливная сахарная свекла. Она имеет невысокую сахаристость и обладает низкой влагоудерживающей способностью. Быстрая потеря тургора поливной свеклой в первый период отрицательно отражается на результатах хранения.

Опытный кагат имел ширину 25 *м*, высота кагатов была 4,7 *м*. Из трех очагов поражения контрольного кагата было удалено 21,3% свеклы. В опытном кагате очагов поражения не было. Среднесуточные потери сахара в опытном кагате на Засельском сахарном заводе оказались в 2,5 раза ниже, чем в контрольном.

После окончания монтажных работ до укладки свеклы на Засельском сахарном заводе было проведено исследование влияния

тепла, эквивалентного работе вентиляторов, и тепла грунта на параметры приточного воздуха, поступающего через щели нагнетательных воздуховодов и кагаты. Наблюдения проводились в предутренние часы, когда температура наружного воздуха была на 3—4° С ниже температуры воздуховодов, т. е. при обычных условиях вентилирования кагатов. Параметры воздуха определялись с помощью психрометра Ассмана.

На рис. 11 показаны процессы изменения состояния воздуха в вентиляторе и воздуховоде. Последовательно протекают три процесса: $AB$ — подогрев в вентиляторе, $BC$ — адиабатическое охлаждение в увлажнителе, $CD$ — нагревание и увлажнение воздуха при контакте его с влажными и теплыми стенками воздуховодов. Таким образом, результативный процесс $BD$ протекает почти по изотерме, но сопровождается повышением влажности воздуха. Воздух поступает в насыпь свеклы с параметрами точки $D$ вместо параметров точки $B'$, которые были бы без увлажнения воздуха. С учетом путевого нагревания воздуха без увлажнения стенок воздуховодов точка $B'$ будет лежать выше точки $B$. Важно отметить стабильность рассмотренных процессов. Охлаждение свеклы занимает не менее 2 недель. Коэффициент рабочего времени вентиляторов 0,2—0,3. После прекращения вентилирования стенки воздуховодов благодаря тепловому контакту с кагатом каждый раз снова приобретают температуру, близкую к температуре сырья.

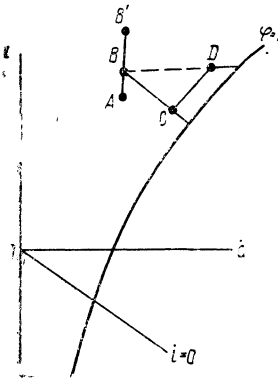


Рис. 11. Процессы в вентиляторе и воздуховоде.

Вентилирование кагатов после окончания лечебного периода следует проводить в предутренние часы — часы наибольшего похолодания. Вследствие радиационного теплообмена поверхность грунта в эти часы имеет обычно наиболее низкую температуру. От грунта охлаждается воздух, относительная влажность его повышается (выпадает роса). Поэтому приточный воздух, поступающий через воздухораспределительные щели вблизи вентилятора, нуждается в увлажнении в значительно меньшей мере, чем воздух, подходящий к крайним целям. При длинных воздуховодах ($\sim 25$ *м*) даже в поперечных схемах приходится ставить по длине воздуховода 4—6 форсунок.

В сезоне 1967/68 г. были проведены наблюдения на Засельском сахарном заводе Одесского свеклосахаротреста по выяснению влияния путевого подогрева воздуха (без увлажнения) на качество свеклы. Ширина кагата была 25 *м*, высота 4,8 *м*. Система вентилирования — поперечная, вентиляторы МЦ-10. Естественная убыль свеклы в сеточных пробах, расположенных на уровне 0,5 *м* от подошвы кагата в конце воздуховодов, оказалась в среднем на

40% выше, чем в начале воздуховодов. Количество заплесневелых корней и общее количество гнилой массы в конце воздуховодов было больше, чем вблизи вентиляторов, на 30—40%.

В октябре 1969 г. на сахарном заводе «Большевик» Белгородского свеклосахаротреста был поставлен опыт на кагате с продольной системой вентилирования. Применялся центробежный вентилятор марки Ц-4-76 № 12. Воздуховод был присыпан свеклой слоем высотой 0,5 *м*. При температуре стенок воздуховода 8,3° С, наружной температуре воздуха 3,4° С (предутренние часы) и его относительной влажности 92% был включен вентилятор. Через выходные отверстия на расстоянии 40 *м* от вентиляторов воздух поступал с температурой 7,8° С и имел относительную влажность 69%. На сахарном заводе «Большевик» воздуховоды выполнены из асбоцементных труб. Подача воздуха в кагаты происходит через отдельные колодцы. В сезоне 1969/70 г. была проверена эффективность орошения нижнего, хорошо вентилируемого слоя свеклы. Форсунки располагались факелом в стороны подошвы кагата. При этом количество влаги, подаваемой в кагат, удалось увеличить в 3 раза, причем были обеспечены высокие результаты хранения свеклы.

## ГРАВИТАЦИОННАЯ СИСТЕМА ВЕНТИЛИРОВАНИЯ СЫРЬЯ

### Физическая сущность и особенности системы

Для перемещения больших масс воздуха в теплонапряженных производственных помещениях широко используется гравитационная система вентилирования (аэрация), в основе которой лежит организованная (интенсифицированная) естественная вентиляция. В технике хранения сочного растительного сырья она, по существу, не применяется, хотя и обладает важными преимуществами, в частности саморегулированием температурного режима.

Условимся различать контактное и бесконтактное гравитационное вентилирование. В первом случае воздух хранилища непосредственно соприкасается с сырьем, во втором отвод тепла к воздуху хранилища происходит через стенку.

На рис. 12 показана принципиальная схема гравитационной системы контактного вентилирования, которая была проверена в промышленных условиях и внедрена при участии инженера В. И. Ивахнова на Одесском опытно-экспериментальном консервном заводе им. В. И. Ленина в овощехранилище емкостью 250 *т*.

Перекрытие хранилища совмещенное, состоит из ребристых железобетонных плит *1*. На участке между ребрами *2* имеется слой теплоизоляции *3*, под которым размещаются штабеля контейнеров с сырьем *4*. С боков штабеля ограничены полиэтиленовой пленкой *5*, нижние контейнеры установлены на подставках *6* высотой 0,15 *м*. Пол хранилища до установки контейнеров электропогрузчиками покрывался слоем влажных опилок *7*. Под реб-

рами перекрытия смонтированы охлаждающие приборы *8* (трубы с прямыми ребрами). Они размещаются между штабелями сырья и обеспечивают ниспадающие токи холодного воздуха. Внутри штабелей возникают восходящие токи относительно теплого воздуха. Периодическое (через 8—10 суток) оттаивание охлаждающих приборов обеспечивает восстановление влажности опилок, находящихся на полу. Таким образом наряду с рециркуляцией воздуха осуществляется частичная рециркуляция влаги, что защищает сырье от увядания.

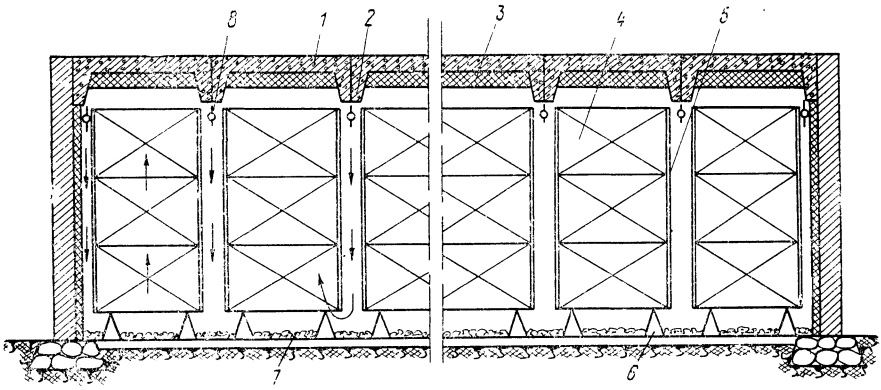



Рис. 12. Схема контактной гравитационной системы вентилирования сырья.

Система предназначена прежде всего для хранения сырья со слабой влагоудерживающей способностью. Ее основные преимущества:

1. Стабильность температурного и влажностного режимов.

2. Локальное саморегулирование температуры в насыпи сырья: в тех местах, где по каким-либо причинам возникает более интенсивное самосогревание сырья, обеспечивается более интенсивное вентилирование.

3. Простота устройства и надежность работы. В хранилище отсутствуют вентиляторы, воздуховоды и приборы автоматики.

4. Простота автоматизации системы: достаточно поддержание определенной температуры кипения холодильного агента или температуры рассола (в зависимости от температуры воздуха в хранилище).

5. Направленная конденсация водяного пара на охлаждающих приборах, а с наступлением морозов на неизолированных ребрах плит перекрытия, которые играют роль мостиков холода.

6. Высокая, приближающаяся к 100% относительная влажность воздуха в массе сырья.

Элементы используемого в настоящей системе процесса направленной конденсации водяных паров имели место в некоторых овощехранилищах США. И. Л. Волкинд и Г. Ф. Шуметов пишут:

«Заслуживает внимания применяющееся в США управление процессами конденсации водяных паров внутри овощехранилища. Для саморегулирования влажности воздуха устраивается в верхней части боковых стен специальная неутепленная конденсационная поверхность» [28, стр. 127]. Такой специальный пояс в верхней части стен не может обеспечить регулирование влажностного режима во всей массе сырья и предупреждать его отпотевание.

Использование ребристых плит перекрытия для направленной конденсации пара — принципиально новое в предложенной нами системе. Перекрытия из ребристых плит обычно не рекомендуются, они приводят к образованию застойных зон воздуха. На это указывают П. Гуль [46] и Е. П. Широков, который пишет: «При любой конструкции перекрытия необходимо применять только плоские плиты, без выступающих ребер» [2, стр. 34]. Таким образом, то, что обычно считается дефектом, при гравитационном вентилировании играет положительную роль. Основной период хранения сырья приходится на холодное время года. Толщина изоляции перекрытия выбирается из условий теплового баланса между теплом дыхания и теплопотерями в холодное время года.

М. В. Антонов и Н. Е. Кучеренко [10] отмечают преимущества хранения сырья в местах производства: стоимость хранения в этом случае на 30—40% меньше, чем в городах, затраты на строительство на 30% ниже. На хранение поступает свежее сырье с хорошим тургором. В условиях глубинных пунктов заготовки сырья простота охлаждающих систем приобретает решающее значение. Г. Л. Басин подчеркивает, что работа автоматики без человека связана с большим риском: при выключении тока каналы наружного воздуха остаются открытыми и может произойти подмораживание продукции [15].

Эксплуатация гравитационной системы в зимний период отличается предельной простотой. Автоматизм заложен в самой охлаждающей системе: при понижении температуры в штабеле до температуры воздуха в хранилище гравитационное вентилирование сырья прекращается, там же, где температура сырья растет (вследствие биологических процессов), вентилирование усиливается.

Интенсивность гравитационного вентилирования определяется законом сохранения энергии, который в рассматриваемом случае может быть выражен уравнением Бернулли:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{w^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{w^2}{2g} + Z_2,$$

где $\frac{p}{\rho}$ — энергия давления;

$\frac{w^2}{2g}$ — кинетическая энергия;

$Z$ — энергия положения.

Точки 1 и 2 относятся к одному и тому же уровню, т. е. $Z_1=Z_2$. Точка 2 характеризует состояние среды в узком сечении (например, в выходном отверстии), точка 1 относится к состоянию среды внутри шахты (в штабеле).

Площадь сечения потока воздуха в шахте (штабеле) значительно больше, чем в выходном отверстии, поэтому принимают $w_1=0$. Тогда $w_2=w=\sqrt{\frac{2g(p_1-p_2)}{\rho}}$; $p_1-p_2=H$, где $H$ — напор в $н/м^2$. Он равен половине теплового давления [148], т. е. $H=H_т/2$, $H_т=h(\rho_1-\rho_2)$. Таким образом,

$$w=\sqrt{\frac{gh(\rho_1-\rho_2)}{\rho}},$$

где $w$ — скорость воздуха в данном выходном (или входном) отверстии (принимаем площади сечения их равными), $м/сек$;
$h$ — расстояние между входным и выходным отверстием, $м$;
$\rho$ — плотность воздуха снаружи штабеля, $кг/м^3$;
$\rho_1$ — плотность воздуха внутри штабеля, $кг/м^3$;
$\rho_2$ — средняя плотность воздуха, $кг/м^3$.

Из характеристического уравнения

$$\rho_1-\rho_2=\frac{p_1}{RT_1}-\frac{p_2}{RT_2},$$

где $p_1$ — давление снаружи штабеля, $н/м^2$;
$p_2$ — давление внутри штабеля, $н/м^2$,

$$p_1\approx p_2=p;$$

$T_1$, $T_2$ — абсолютная температура воздуха внутри и снаружи штабеля, °К,

$$\rho_1-\rho_2=\frac{p(T_2-T_1)}{RT_1T_2};\quad \rho=\frac{p}{RT_{ср}}.$$

Для условия хранения сырья

$$\frac{T_{ср}}{T_1T_2}\approx\frac{T_2}{T_1T_2}=\frac{1}{273};$$

$$\frac{gh(\rho_1-\rho_2)}{\rho}\approx\frac{gh(t_2-t_1)}{273}.$$

Окончательно

$$w=0{,}2\sqrt{gh(t_2-t_1)}.$$

Расход воздуха при площади живого сечения $f$ $м^2$

$$V_f=0{,}2\,\mu' f\sqrt{h(t_2-t_1)}, \tag{59}$$

где $V_f$ — расход воздуха, $м^3/сек$;
$\mu'$ — экспериментально определяемый коэффициент расхода.

Ожидаемые значения $\mu' = 0{,}5 \div 0{,}6$. Приняв $\mu' = 0{,}55$, получим расход воздуха (в $м^3/ч$)

$$V' = 390 f \sqrt{h (t_2 - t_1)} . \qquad (59')$$

В одном из английских справочников по отоплению и вентиляции [119] приводится аналогичная (без вывода) формула, в которой коэффициент перед радикалом колеблется в пределах от 318 до 415.

Н. В. Сабуров, М. В. Антонов и Е. П. Широков [141] ссылаются на нашедшие практическое применение в ГДР данные о зависимости требуемой площади сечения приточных труб при аэрации от высоты расположения вытяжных отверстий для одного и того же расхода воздуха. В табл. 28, показывающей влияние высоты штабеля на интенсивность гравитационного вентилирования, эти данные в относительных единицах сопоставляются с расчетными величинами, полученными по уравнению (59).

Таблица 28

| Высота штабеля, *м* | Коэффициенты | | Высота штабеля, *м* | Коэффициенты | |
|---|---|---|---|---|---|
| | опытные | расчетные | | опытные | расчетные |
| 4 | 1,00 | 1,00 | 8 | 1,34 | 1,41 |
| 6 | 1,12 | 1,22 | 11 | 1,60 | 1,64 |

В трех случаях из четырех расхождение между опытными и расчетными величинами не превышает 5%, в одном случае оно составляет 9%.

Температуру воздуха в зазоре (продухе) между штабелями (рис. 12) можно считать постоянной, равной $t_1$, так как охлаждающие приборы расположены сверху. Температура внутри штабеля: внизу $t'_2$, вверху $t''_2$.

Составим уравнение теплового баланса

$$Q_f = q h \rho_н , \qquad (а)$$

где $Q_f$ — тепло дыхания, выделяемое сырьем, *вт* на 1 $м^2$ пола;
$q$ — удельная энергия дыхания, *вт/кг*;
$h$ — высота штабеля, *м*;
$\rho_н$ — насыпная плотность сырья (с учетом тары), $кг/м^3$.

С другой стороны,

$$Q_f = V \rho c_p (t''_2 - t'_2) \xi , \qquad (б)$$

где $c_p$ — теплоемкость воздуха [$c_p = 1068$ *дж/(кг · град)*];
$\rho$ — плотность воздуха [$\rho = 1{,}29$ $кг/м^3$].

Решая совместно уравнения (59), (а) и (б), получим

$$\Delta t = 0{,}03\left(\frac{q\,\rho_н}{\mu\, f_п\, \xi}\right)^{0{,}67} h^{0{,}33}, \qquad (60)$$

где $f_п$ — площадь входных отверстий для воздуха, приходящаяся на 1 $м^2$ площади пола, $м^2$.

Уравнение (60) имеет важное практическое значение. Оно вскрывает характер влияния высоты насыпи сырья на максимальную разность температур по вертикали. При увеличении высоты штабеля в 2 раза указанная разность температур возрастает в $2^{0{,}33}=1{,}26$ раза, т. е. всего на 26%.

Таким образом, в отличие от условий при естественной вентиляции зависимость разности температур от высоты насыпи сырья при гравитационном вентилировании благоприятная. Из уравнения (60) видно, что указанная разность температур будет тем меньшей, чем меньше энергия дыхания, насыпная плотность сырья, высота слоя его и чем больше площадь входных и выходных отверстий (применение элементов гравитационного вентилирования в буртах и траншеях давало малый эффект прежде всего из-за малого сечения приточных и выходных отверстий), а также чем больше влаговыделения, влияющие на энтальпийный коэффициент.

Следует отметить более благоприятное, чем при активном вентилировании, влияние тепла дыхания на температурное поле в насыпи сырья: в уравнение (60) тепло дыхания входит в степени 0,67, в уравнение разности температур при активном вентилировании — в степени 1. Это объясняется тем, что тепло дыхания в рассматриваемой системе вызывает не только самосогревание сырья, но и перемещение воздуха под влиянием гравитационных сил.

Основные закономерности, выраженные уравнением (60), проверялись экспериментально. Действительная разность температур по высоте насыпи моркови на Одесском консервном заводе им. В. И. Ленина не превышала расчетной величины. Последняя вычислялась для следующих условий: $q=0{,}013$ *вт/кг*, $\rho_н=600$ *кг/м*$^3$, $h=2$ *м*, $\mu=0{,}55$, $f_п=0{,}3$ $м^2$, $\xi=1{,}67$. По уравнению (60) $\Delta t=0{,}37$. Действительная разность температур составила 0,3° С, что объясняется возникновением внутри пристенных штабелей (у поверхности пленки) замкнутых циркуляционных контуров, несколько выравнивающих температурное поле — как при омывающей вентиляции.

В сезоне 1967/68 г. на Одесской торгово-закупочной базе «Торгмортранс» была проверена эффективность контактного гравитационного вентилирования картофеля и капусты в охлаждаемых хранилищах.

Картофель поступал из Винницкой области частично увядший. Убран с поля 8 сентября 1967 г. Закладка на хранение производилась с 20 по 24 сентября 1967 г. Охлаждение осуществлялось медленно — в течение месяца. Температура хранения 3—4° С.

Размеры охлаждаемого картофелехранилища в плане 11,5×60 *м*, высота 4,4 *м*, в том числе до уровня земли 3 *м*. Система охлаждения воздушная, центробежный вентилятор установлен неправильно — после воздухоохладителя. Относительная влажность воздуха непосредственно после воздухоохладителя 90%; в результате нагревания в вентиляторе она падала до 83—85%. Подача воздуха верхняя — со свойственными ей недостатками. Почти во всех верхних контейнерах на глубине 0,10—0,12 *м* наблюдались зоны отпотевания клубней.

Относительная влажность воздуха внутри контейнеров, измеренная десятиступенчатым гипертермопарным психрометром, составляла 95—97%.

В опытном штабеле количество контейнеров в плане 3×3, по высоте 5. Емкость каждого контейнера около 400 *кг* картофеля. Штабель огражден с боков полиэтиленовой пленкой толщиной 40 *мкм*. Зазор между полом и дном контейнера 0,12 *м*. Расстояние от пола до пленочного ограждения 0,25 *м*. Контрольный штабель отличался от опытного только отсутствием пленочного ограждения.

В табл. 29 приводятся результаты хранения картофеля в течение 250 суток при контактном гравитационном вентилировании.

Таблица 29

| Показатель | Опытный штабель (с гравитационным вентилированием) | Контрольный штабель |
|---|---|---|
| Естественная убыль, % | | |
| нижний контейнер (1-й ярус) . . | 3,9 | 5,2 |
| средний контейнер (3-й ярус) . . | 3,8 | 4,8 |
| верхний контейнер (5-й ярус) . . | 5,0 | 10,2 |
| Количество загнивших клубней, % | | |
| нижний контейнер . . . . . | 12,2 | 23,2 |
| средний контейнер . . . . . | 12,0 | 23,1 |
| верхний контейнер . . . . . | 11,7 | 23,3 |

Как видно из таблицы, гравитационное вентилирование позволило уменьшить естественную убыль картофеля в 1,6 раза и количество загнивших клубней в 1,9 раза.

## Эффективность контактной гравитационной системы вентилирования при хранении моркови

Морковь, обладающая крайне низкой лежкоспособностью, может служить эталонным сырьем при сравнительной оценке различных способов хранения, так как самые незначительные их дефекты при хранении этого вида сырья проявляются четко и приводят к большим потерям. Эту особенность моркови, обусловленную тонкой кожурой и крупными межклетниками, отмечают многие исследователи [43, 134, 141, 150, 181].

В сезоне 1966/67 г. на Одесском опытно-экспериментальном консервном заводе им. В. И. Ленина при участии инженера Ивахнова В. И. подвергались проверке в промышленных условиях три способа хранения моркови:

1. Активное вентилирование кондиционированным воздухом.
2. Гравитационное вентилирование.
3. Активное вентилирование атмосферным воздухом (контрольный способ).

Общая продолжительность хранения 160 суток. Преобладающий сорт — Шантанэ. Удельный расход воздуха при активном вентилировании около 80 $м^3/(т \cdot ч)$.

Опытные хранилища были размещены под навесом на территории завода и выполнены в виде закромов. Коэффициент теплопередачи ограждений 0,47 $вт/(м^2 \cdot град)$.

В первых двух случаях для увлажнения поступающего в насыпь моркови воздуха в подпольях закромов были размещены металлические поддоны с водой слоем 0,1 *м*. При работе венти-

Таблица 30

| Показатель | Активное вентилирование кондиционированным воздухом | Гравитационное вентилирование | Активное вентилирование атмосферным воздухом (контроль) |
|---|---|---|---|
| Высота слоя сырья, *м* | 1,2 | 1,7 | 1,2 |
| Естественная убыль, % | | | |
| средняя | 4,3 | 2,3 | 7,2 |
| внизу | 4,0 | 2,2 | 8,2 |
| вверху | 5,0 | 2,4 | 6,8 |
| Количество корней, % | | | |
| увядших | — | — | 29,4 |
| проросших | 5,2 | 4,3 | 87,0 |
| полноценных | 96,6 | 98,0 | 89,1 |
| Абсолютный отход | 0,9 | 0,8 | 2,9 |

лятора относительная влажность приточного воздуха была ~ 95%.

Результаты опытного хранения моркови приведены в табл. 30.

Температура моркови в первых двух хранилищах была около 0° С, в хранилище с активным вентилированием атмосферным воздухом — выше: в течение основного периода на 2—3° С, в течение последнего месяца на 4—6° С.

Из табл. 30 видна высокая эффективность системы гравитационного вентилирования: выход полноценных корней максимальный 98%, естественная убыль минимальная 2,3%, абсолютный отход наиболее низкий 0,8%.

Табл. 30 отражает закономерное влияние пониженной влажности воздуха при активном вентилировании атмосферным воздухом (без увлажнения) на естественную убыль сырья в нижнем слое (8,2% вместо 6,8% сверху).

В результате проведенных экспериментов установлено закономерное влияние степени увядания корнеплодов на абсолютный отход и прорастание: с увеличением степени увядания прорастание усиливается. А. А. Холмквист [172] в качестве общего вывода подчеркивает, что увядание способствует прорастанию корнеклубнеплодов.

В сезоне 1967/68 г. на Одесском опытно-экспериментальном консервном заводе им. В. И. Ленина были продолжены опыты по хранению моркови и столовой свеклы при активном вентилировании увлажненным и атмосферным воздухом, которые подтвердили прямую связь абсолютных отходов и прорастания корнеплодов с естественной убылью (потерей влаги).

Увлажнение вентилирующего воздуха при хранении моркови позволило уменьшить абсолютный отход в 1,9 раза и количество проросших корней в 1,4 раза.

## Бесконтактная гравитационная система вентилирования сырья

Бесконтактное вентилирование применяется при хранении плодов в упаковках из полимерных материалов. Основное преимущество его, как отмечалось выше, заключается в своеобразном локальном кондиционировании воздуха: внутри упаковок создается микроклимат, не зависящий от влажности воздуха хранилища.

Многие исследователи объясняют вполне удовлетворительные результаты хранения плодов в упаковках из полимерных материалов повышенным содержанием углекислого газа, упуская при этом из виду высокую равновесную влажность воздуха, способствующую сохранению тургора растительной ткани. Трудно сказать, какой из этих факторов играет преобладающую роль.

Бесконтактный отвод тепла дыхания воздухом (бесконтактное вентилирование) при хранении плодов в упаковках из полимерных материалов имеет два существенных недостатка:

1. Отсутствие направленного отвода конденсата (за пределы упаковки).

2. Формирование температурного поля внутри упаковок осуществляется под влиянием неупорядоченных циркуляционных токов воздуха, типичных для естественной вентиляции.

Первый недостаток приводит к попаданию капельножидкой влаги на сырье и возникновению «инфекционных капель». Хранение сырья без влаговыделений возможно только в том случае, когда тепло дыхания отводится теплопроводностью. Конвективный теплообмен между плодами и воздухом, рециркулирующим в герметически закрытых упаковках, неизбежно сопровождается влаговыделениями даже при равновесной влажности воздуха 100% (см. гл. II), поэтому размер капель, выпадающих на стенках упаковок, все время увеличивается, что приводит к их периодическому отрыву и попаданию на сырье. Этот недостаток неоднократно отмечался в литературе. Установлено, что морковь лучше хранится в открытых полиэтиленовых мешках [123]. А. Г. Гусейнов [48] рекомендует применять перфорированные упаковки (для отвода непрерывно выделяющегося водяного пара). Л. В. Метлицкий [105] указывает, что важным средством защиты плодов от увядания является обертка их в бумагу, хранение в полиэтиленовых пленках, и подчеркивает, что капелек на плодах и овощах не должно быть.

Не менее важным является второй фактор — формирование температурного поля в упаковках. Чем крупнее упаковка, тем неравномернее температурное поле в ней. Даже при хранении сырья в траншеях (высота слоя 0,4 *м*) наблюдается послойное изменение температуры. П. Ф. Сокол [149] приводит средние для декабря значения температуры картофеля в мелких траншеях: верх 2,7, середина 6,6, низ 3,1° С.

Отсутствие направленной конденсации водяного пара и преобладание элементов естественной вентиляции при хранении плодов в полиэтиленовых пленках приводит не только к выпадению росы на стенках упаковок, но также к отпотеванию сырья внутри насыпи при больших размерах упаковок.

Указанные недостатки бесконтактного вентилирования устранены в предложенной автором[1] конструкции контейнера, схема которого показана на рис. 13. Контейнер имеет двойные воздухонепроницаемые стенки (наружную *1* и внутреннюю *2*) и два днища, из которых внутреннее *3* перфорированное. Оно опирается на подставки *4*. Контейнер имеет наружные подставки *5* высотой около 0,1 *м*. Наружная стенка контейнера имеет отверстия *6* для пробок с калиброванными капиллярными каналами, через которые обеспечивается подача свежего воздуха в количестве, достаточном для предотвращения кислородного голодания сырья (размер ка-

[1] В. З. Жадан. Авторское свидетельство № 260485. «Бюллетень изобретений Комитета по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР», 1970, № 3.

налов устанавливается опытным путем). Сверху контейнер закрывается крышкой *7*, которая опирается на выступы *8*. Для уменьшения стоимости контейнера внутренние стенки его могут быть изготовлены из деревянных планок *9*, которые снаружи обтягиваются полиэтиленовой пленкой *10*.

За рубежом имеется опыт изготовления контейнеров с одинарными воздухонепроницаемыми стенками [32]. Для этого можно использовать искусственные материалы. Большой интерес представляет сообщение французского исследователя К. Леблона [91] на X Международном конгрессе по холоду. Опыт хранения яблок и груш в полиэтиленовых пакетах показал, что состав газовой атмосферы, естественно образующейся вокруг плодов, крайне изменчив. Это положение можно до некоторой степени исправить, применяя тару большой емкости, а также заменяя отдельные мелкие пакеты контейнером с жестким каркасом, поддерживающим стенки из синтетических пленок с избирательной проницаемостью для газов (целлофан, полихлорвинил, полиэтилен). Леблон применил последний способ для хранения груш сорта Вильямс в атмосфере с содержанием 2% кислорода, 4% углекислоты и 94% азота. Этот оптимальный состав атмосферы был получен и легко поддерживался за счет дыхания плодов в контейнере с комбинированными стенками из полихлорвинила и целлофана (отношение их поверхностей 1,5). Изменяя отношение поверхностей пленок, образующих стенки контейнера можно в широких пределах изменить состав атмосферы в контейнере.

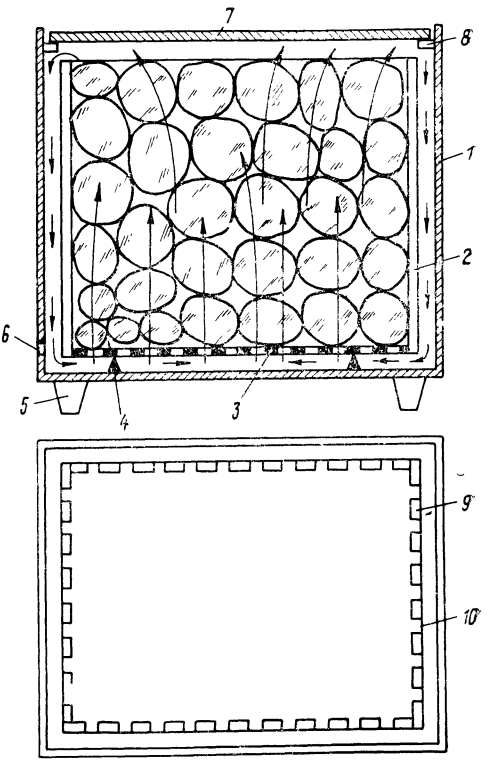


Рис. 13. Схема бесконтактной гравитационной системы вентилирования сырья.

При использовании пленок с избирательной проницаемостью отпадает необходимость в пробках с калиброванными каналами. (Для видов сырья, нуждающихся в аутоконсервировании, таких, как морковь, они заведомо не нужны).

Особенности описываемого контейнера:

1. Направленная конденсация водяного пара вне грузового

объема — в зарубашечном пространстве — на внутренней поверхности *1*, охлаждаемой снаружи воздухом хранилища.

2. Организованное (гравитационное) вентилирование сырья при локальном кондиционировании воздуха.

Контейнеры устанавливаются с небольшими зазорами (в плане) в 4—5 рядов по высоте. Подача воздуха верхняя или нижняя при непрерывной работе вентиляторов.

Наибольшему охлаждению при этом будут подвергаться боковые наружные стенки контейнеров. Выпадающий на них конденсат будет стекать и скапливаться на наружном днище. Расчет показывает, что максимальный слой конденсата за сезон при внутренней емкости контейнера 1 $м^3$ не превысит 20 *мм*.

Основные преимущества контейнера:

1. Изотермическое хранение сырья при стабильном режиме.
2. Минимальная потеря влаги.
3. Предотвращение отпотевания сырья.
4. Возможность хранения сырья при любой влажности вентилирующего воздуха.
5. Возможность максимальной загрузки хранилища по высоте.
6. Работа воздухоохладителей без оттайки.

А. А. Колесник [80] отмечает, что при повышенной постоянной температуре плоды и овощи сохраняются лучше, чем при низких колеблющихся температурах. Изотермический режим хранения — важное преимущество контейнеров.

Возможность хранения сырья при любой влажности воздуха в хранилище — одно из важнейших достоинств контейнера. Г. Спенсер-Грегори и Е. Роурке [153], обобщившие работы по гигрометрии, пришли к заключению, что в настоящее время нет способов, обеспечивающих точное определение влажности воздуха. Наиболее распространенный прибор — психрометр — сконструирован, по их твердому убеждению, на неудовлетворительной основе и не точен.

В описываемом контейнере имеет место локальное кондиционирование воздуха. Автоматизм регулирования влажностного режима заложен в самом способе хранения: при высокой влагоудерживающей способности сырья относительная влажность воздуха, поступающего в зарубашечное пространство, будет ниже 100%, поэтому конденсация водяного пара начнется не сразу, что приведет к уменьшению общей величины влажной поверхности и некоторому понижению влажности приточного воздуха; при слабой влагоудерживающей способности сырья вся боковая поверхность наружной оболочки контейнера со стороны продуха будет влажной, поэтому равновесная относительная влажность рециркулирующего воздуха окажется выше, чем в первом случае.

Контейнер предназначен прежде всего для хранения ценных видов сырья с использованием искусственного холода. Возможны два способа охлаждения сырья до заданной температуры:

1. В камерах хранения, для чего в них должна поддерживаться температура на 2—3° С ниже обычной.

2. В камерах предварительного охлаждения до укладки сырья в контейнеры.

Первый способ следует применять при хранении сырья в местах заготовки.

Предварительное охлаждение перед транспортировкой и хранением широко практикуется за рубежом [35] и рекомендуется советскими специалистами [136].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Среди различных видов сочного растительного сырья сахарная свекла по масштабам производства и хранения занимает первое место.

2. Прямоточно-рециркуляционная система вентилирования свекловичных кагатов (авторское свидетельство № 171681 от 29 марта 1965 г.) в годы с неустойчивой погодой позволяет снижать потери сахара за период хранения в 3,5—4,0 раза.

3. Стенки подземных воздуховодов в системах активного вентилирования находятся в непрерывном тепловом контакте с насыпью сырья, имеющей температуру на 3—5° С выше температуры приточного воздуха, вследствие чего происходит путевой подогрев его в воздуховодах, приводящий к снижению относительной влажности на 5—10%. По указанной причине активное вентилирование сырья со слабой влагоудерживающей способностью без увлажнения воздуха недопустимо, а схемы увлажнения перед подачей воздуха в воздуховоды недостаточно эффективны.

Путевое снижение влажности воздуха необходимо корректировать путевым увлажнением его в самих воздуховодах.

Увлажнение вентилирующего воздуха при хранении сахарной свеклы сокращает потери сахара в 1,5—2,5 раза.

4. При холодильном хранении сочного растительного сырья весьма эффективными являются контактная и бесконтактная гравитационные системы вентилирования.

5. Установлены основные закономерности гравитационного вентилирования сырья. При температуре 0° С и энергии дыхания 0,015 *вт/кг* максимальная разность температур в слое сырья высотой 2,0—2,5 *м* менее 0,5° С. Увеличение высоты загрузки хранилища в 2 раза увеличивает разность температур сырья по вертикали всего на 26%.

6. Бесконтактная система гравитационного вентилирования сырья в контейнерах с направленным отводом конденсата (авторское свидетельство № 260485 от 13 октября 1969 г.) обеспечивает изотермическое хранение при минимальных потерях влаги независимо от влажности воздуха в хранилищах и непрерывную работу воздухоохладителей без оттайки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании обобщения собственных наблюдений и опытных данных других авторов установлено, что решающим условием успешного хранения сочного растительного сырья является максимальная защита его от потерь влаги. Разработаны важнейшие принципы и средства реализации этого условия.

2. Сформулировано основное правило кондиционирования воздуха в плодоовощехранилищах: для уменьшения опасности образования зон увядания и отпотевания сырья, вызывающих развитие микробиологических процессов, необходимо, чтобы в области температур, близких к 0° С, при отводе тепла к воздуху приходилось: на долю явного тепла 60%, на долю скрытого тепла 40% общего количества тепла.

3. Разработана методика обоснования оптимальной влажности воздуха, удовлетворяющей указанному требованию, и предложена простая расчетная формула, согласно которой относительная влажность воздуха должна быть тем выше, чем ниже температура, меньше энергия дыхания, меньше влагоудерживающая способность сырья, больше контактная поверхность и выше скорость воздуха.

4. Входящая в расчетную формулу экспериментально определяемая по предложенной методике массообменная характеристика сырья меняется во времени, поэтому относительная влажность воздуха в хранилищах не может оставаться постоянной и должна корректироваться по фазам хранения (например, для картофеля в лечебный период, основной период хранения и с начала прорастания).

5. Установлено значительное влияние на влаговыделения перепада температур на границе сырье — воздух при относительной влажности меньше 100%. Если воздух не насыщен влагой, указанный перепад температур должен быть не ниже 1° С.

6. Использование низкотемпературного естественного холода может стать важным средством совершенствования техники хранения сырья. Основным преимуществом проверявшегося Е. П. Широковым способа пульсирующего отвода энергии дыхания воздухом низких отрицательных температур является снижение общих потерь влаги сырьем. Разработана методика обоснования безопасных режимов пульсирующего охлаждения сырья, дающая результаты, удовлетворительно согласующиеся с опытными данными.

7. Наряду с положительными сторонами системы активного вентилирования (незначительное влияние на сырье внешних теплопритоков через верхнее и боковые ограждения хранилищ, саморегулирование влажностного режима в основной массе сырья, благоприятные условия в фазе охлаждения) основным органическим недостатком ее при хранении сырья со слабой влагоудерживающей способностью является путевое снижение влажности воздуха в приточных воздушных каналах вследствие теплового контакта их с сырьем, что часто приводит к увяданию и деформации элементов сырья в наиболее нагруженном нижнем слое, уменьшению скважистости, нарушению нормальных условий аэрации и большим потерям. При хранении сырья со слабой влагоудерживающей способностью целесообразно увлажнять вентилирующий воздух в самих воздуховодах.

8. Прямоточно-рециркуляционная система вентилирования свекловичных кагатов, основанная на защите свеклы от подмораживания теплом дыхания, позволяет в годы с неустойчивой погодой в зимнее время снижать потери сахара по сравнению с существующими способами хранения в 3—4 раза при сроке окупаемости капиталовложений до 1 года.

9. Система гравитационного вентилирования увлажненным воздухом сырья со слабой влагоудерживающей способностью обеспечивает изотермический режим хранения при небольших потерях.

10. Средства кондиционирования воздуха позволяют при небольших затратах эффективно использовать природные ресурсы для существенного совершенствования техники хранения сырья. Важнейшим из них является увлажнение вентилирующего воздуха, сопровождающееся испарительным охлаждением, что особенно существенно для южных районов страны с сухим и жарким климатом.

11. В результате теоретических и экспериментальных исследований предложены расчетные формулы, предназначенные для использования при проектировании установок кондиционирования воздуха в хранилищах: для определения влаговыделений сырья; учета количества физиологического тепла, выделяемого сырьем за период охлаждения; определения расхода холода, расхода вентилирующего воздуха, темпа самосогревания сырья, путевого подогрева вентилирующего воздуха и продолжительности охлаждения сырья.

---

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ


1. Адамов И. И. Хранение картофеля. Минск, Госиздат БССР, 1951.
2. «Активное вентилирование картофеля и капусты при хранении». М., «Колос», 1966.
3. Алексеев П. А. Что нужно знать о хранении фруктов. «Холодильная техника», 1963, № 2.
4. Алексеев П. А. Опытные железнодорожные перевозки винограда. «Холодильная техника», 1963, № 6.
5. Алексеев П. А., Россовский Л. С. Естественная убыль абрикосов и винограда при железнодорожных перевозках в вагонах-ледниках. «Холодильная техника», 1963, № 2.
6. Алямовский И. Г. К расчету физиологического тепла, выделяемого при охлаждении плодов и овощей. «Холодильная техника», 1969, № 8.
7. Алямовский И. Г. Зависимость интенсивности дыхания и тепловыделения плодов и овощей от температуры. «Холодильная техника», 1967, № 6.
8. Алямовский И. Г. Теплофизические характеристики пищевых продуктов при замораживании. «Холодильная техника», 1968, № 5.
9. Антокольская М. Я. и др. Справочник по сырью, полуфабрикатам и готовым изделиям кондитерского производства. М., Пищепромиздат, 1964.
10. Антонов М. В., Кучеренко Н. Е. Хранение картофеля в местах производства. В кн.: «Хранение картофеля и овощей при активном вентилировании», М., «Экономика», 1965.
11. Басин Г. Л. Вентиляция картофелехранилищ контейнерного типа. «Советская торговля», 1965, № 8.
12. Басин Г. Л. Вентиляция хранилищ картофеля, овощей и фруктов. «Отопление и вентиляция производственных сельскохозяйственных зданий». Тезисы докладов. М., Стройиздат, 1967.
13. Басин Г. Л. К расчету температурно-влажностного режима овощехранилищ. Доклады ТСХА. Вып. 93. «Биология, земледелие и растениеводство», 1963.
14. Басин Г. Л. Повышение экономичности вентиляционных установок овощехранилищ. «Водоснабжение и санитарная техника», 1965, № 6.
15. Басин Г. Л. Опыт эксплуатации системы вентиляции при навальном способе хранения картофеля и стеллажном хранении капусты. В кн.: «Хранение картофеля и овощей при активном вентилировании», М., «Экономика», 1965.
16. Басин Г. Л. Расчет воздухообменов и температурно-влажностных режимов картофелехранилищ. «Отопление и вентиляция промышленных и сельских зданий». Сб. № 16. М., Стройиздат, 1965.
17. Басин Г. Л. Исходные данные для расчета воздухообменов в овощехранилищах. «Отопление и вентиляция промышленных, жилых, общественных и сельскохозяйственных зданий». Сб. № 13. М., Госстройиздат, 1963.
18. Берман Л. Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. М.—Л., «Госэнергоиздат», 1957.
19. Борцов К. В., Сморжинский В. Б., Бахмутова Р. Я. Об организации хранения фруктов в колхозах и совхозах Северного Кавказа. «Холодильная техника», 1966, № 1.
20. Боряев В. Е., Рубанюк А. П. Изучение состава кутикулы яблок и груш в связи с их влагоудерживающей способностью. 2-я Всесоюзная конференция по проблемам товароведения продовольственных товаров. Сентябрь 1967 г. Тезисы докладов. Донецк, 1967.

21. Босько В., Китовец К. Навальное хранение картофеля с активной вентиляцией. «Картофель и овощи», 1968, № 10.
22. Бруев С. Н. Хранение яблок. М., «Экономика», 1966.
23. Верещагин Н. И. Новое в механизации возделывания, уборки и хранении картофеля. «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», 1966, № 2.
24. Верменко Я. Активная вентиляция буртов. «Картофель и овощи», 1967, № 10.
25. Войтко А. М., Глебов С. И. Замораживание плодов и овощей в псевдоожиженном и плотном слоях. «Холодильная техника», 1968, № 7.
26. Войтко А. М., Ковалева Р. И. Исследование теплопроводности и вязкости концентрированного виноградного сока. «Консервная и овощесушильная промышленность», 1966, № 10.
27. Войтко А. М., Ковалева Р. И., Цаплин В. А. Исследование некоторых характеристик концентрированного виноградного сока. «Консервная и овощесушильная промышленность», 1964, № 11.
28. Волкинд И. Л., Шуметов Г. Ф. Опыт строительства и эксплуатации овощехранилищ. «Сельскохозяйственное строительство», М., Госстройиздат, 1963.
29. Волкинд И. Л., Шуметов Г. Ф. и др. Хранение овощей при активной вентиляции. «Консервная и овощесушильная промышленность», 1965, № 10.
30. Волосов Ю. В. О высоте слоя картофеля при хранении в закромах с активным вентилированием. Доклады ТСХА. Вып. 93. «Биология, земледелие и растениеводство», 1963.
31. Волосов Ю. В. Хранение картофеля в хранилищах при активном вентилировании. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., 1964.
32. Волосов Ю. В. Активное вентилирование картофеля в контейнерах. «Картофель и овощи», 1967, № 12.
33. Волосов Ю. В. Исследование хранения картофеля в закромных хранилищах при активной вентиляции. М., «Экономика», 1965.
34. Высоцкая О. М. Хранение фруктов в камерах с различными системами охлаждения. «Холодильная техника», 1963, № 4.
35. Галченко Н. В. Хранение плодов. Обзор зарубежной литературы. «Садоводство», 1967, № 12.
36. Гинзбург А. С. Сушка пищевых продуктов. М., «Пищепромиздат, 1960.
37. Гинзбург А. С. Развитие теории и технологии сушки пищевых продуктов за 50 лет Советской власти. М., ЦИНТИпищепром, 1967.
38. Гоголин А. А. О применении уравнения Льюиса при расчете поверхностных воздухоохладителей. «Холодильная техника», 1962, № 5.
39. Гоголин А. А., Агарев Е. М., Богатырева С. Ф. Кондиционирование воздуха в камерах опытного холодильника ВНИХИ. «Холодильная техника», 1966, № 5.
40. Головкин Н. А. О некоторых закономерностях процесса кристаллизации льда в растительной ткани. «Холодильная техника», 1967, № 2.
41. Головкин Н. А. Влияние адаптации на лежкость яблок в условиях близкриоскопических температур. «Известия вузов. Пищевая технология», 1967, № 4.
42. Головкин Н. А., Чижов Г. Б. «Холодильная технология пищевых продуктов». М., Госторгиздат, 1963.
43. Гримм А. И. О сокращении потерь моркови при хранении. В кн.: «Прогрессивные методы хранения картофеля, овощей и плодов и улучшение торговли ими». Киев, 1966.
44. Гримм А. И., Борисов С. Б. Болезни плодов и овощей при хранении. М., Госторгиздат, 1958.
45. Громов М. А., Красовицкая Г. И. Теплофизические характеристики картофеля и овощей. «Консервная и овощесушильная промышленность», 1967, № 9.
46. Гуль П. Картофелехранилище. Перев. с нем. М., Изд-во иностр. лит. 1959.

47. Гусев Н. А. Некоторые закономерности водного режима растений. М., Изд-во АН СССР, 1959.
48. Гусейнов А. Г. К вопросу хранения яблок в различной упаковке. Доклады ТСХА. Вып. 93. «Биология, земледелие и растениеводство», 1963.
49. Данилова Г. Н. Прибор для определения теплопроводности жидкостей. «Исследования в области холодильной техники и технологии». Т. IV, М., Пищепромиздат, 1963.
50. Джафаров А. Ф., Антонов М. В., Волков Е. М. Товароведение овощей и плодов. М., «Экономика», 1966.
51. Дженеев С. Хранение столовых корнеплодов в буртах и траншеях. «Виноградарство и садоводство Крыма», 1962, № 11.
52. Дженеев С. Хранение картофеля и овощей в совхозах и колхозах Крыма. «Картофель и овощи», 1965, № 9.
53. Донцов В. А. Интенсивность вентилирования при хранении картофеля в условиях Донбасса. 2-я Всесоюзная конференция по проблемам товароведения продовольственных товаров. Сентябрь 1967 г. Тезисы докладов. Донецк, 1967.
54. Дружинина М. И. Опыт хранения сахарной свеклы на Заметченском сахарном заводе. «Сахарная промышленность», 1957, № 6.
55. Енисеев Р. Г., Шойхет Л. Е., Масленников П. А. Некоторые вопросы хранения свеклы в Киргизии. «Сахарная промышленность», 1966, № 4.
56. Жадан В. З. Удельный вес пищевых продуктов. «Консервная и плодоовощная промышленность», 1940, № 1.
57. Жадан В. З., Хелемский М. З. Экспериментальное исследование количества воды, вымерзающей из свеклы и свекловичного сока. «Сахарная промышленность», 1963, № 9.
58. Жадан В. З. Теплоемкость пищевых продуктов в зависимости от температуры. «Холодильная промышленность», 1940, № 4.
59. Жадан В. З. Расчет физиологического тепла, выделяемого плодами и овощами при хранении. «Холодильная техника», 1968, № 6.
60. Жадан В. З. Теплоемкость пищевых продуктов. «Консервная и плодоовощная промышленность», 1939, № 1.
61. Жолкевич В. Н. Энергетический баланс при дыхании растительных тканей в условиях различного водоснабжения. «Физиология растений». Вып. 4. Т. 8, 1961.
62. Жоровин Н. А. Химический состав, лежкоспособность и кулинарно-технологические качества картофеля, выращиваемого в БССР. Автореферат диссертации на соискание степени канд. техн. наук. М., 1964.
63. Жуковский Д. И. Как хранить урожай. М., Сельхозгиз, 1958.
64. Зиновьев Ю. И. Расчет производительности вентиляционной системы картофелехранилища. «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», 1966, № 12.
65. Игнатков Д. Я. Хранить плоды в хозяйстве — выгодно. «Садоводство», 1965, № 9.
66. Игнатов Н. М. Изменение структуры корней сахарной свеклы при хранении под влиянием отрицательных температур. Доклады ТСХА. Вып. 102. «Биология, земледелие и растениеводство», 1965.
67. Игнатов Н. М. Самосогревание корней при формировании кагатов. «Сахарная свекла», 1967, № 9.
68. Исаченко В. П. Массоотдача при испарении воды из пористой стенки, омываемой воздухом. «Теплоэнергетика», 1961, № 3.
69. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.—Л., «Энергия», 1965.
70. Калугина Ю. П. Аналитическое исследование влагообмена в слое картофеля при активном вентилировании. «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», 1966, № 1.
71. Караваев Н. М., Майков В. П. К определению коэффициентов теплообмена в слое зернистого материала. «Известия АН СССР. Технические науки», 1957, № 11.

72. Карманов В. Г., Меленченко С. Н., Савин В. Н. Изучение динамики водного обмена растения и построение электрического аналога системы водного обмена. «Биофизика». Т. XI, 1966.
73. Карпис Е. Е. Изменение отношения Льюиса для политропических процессов в форсуночных кондиционерах НИИсантехники. «Кондиционирование воздуха». Сб. № 15. М., Госстройиздат, 1963.
74. Китаев Б. Н. Теплообмен в шахтных печах. М., Металлургиздат, 1945.
75. Клячко П. С. Коэффициенты конвективного теплообмена в изодисперсной системе. «Журнал технической физики». Вып. 8, 1948.
76. Книга А. А., Кохановский Н. И., Харин С. Е. Теплопроводность некоторых пищевкусовых продуктов. «Известия вузов. Пищевая технология», 1961, № 2.
77. Кокорин О. Я. Особенности процессов тепло- и массообмена при непосредственном контакте воздуха и воды. НИИсантехники. «Кондиционирование воздуха». Сб. № 18. М., Госстройиздат, 1966.
78. Кокурин В. Ф. Крупный холодильник с цехом переработки фруктов. «Холодильная техника», 1968, № 6.
79. Колтунов В. Хранение капусты в Крыму. «Картофель и овощи», 1967, № 10.
80. Колесник А. А. Факторы длительного хранения плодов и овощей. М., Госторгиздат, 1959.
81. Колесник А. А. Влияние послеуборочного охлаждения яблок на их лежкость. «Холодильная техника», 1965, № 5.
82. Колесник А. А. Хранение плодов в полимерных пленках. М., ЦИНТИпищепром, 1966.
83. Колесник А. А., Огнева О. К. Изменение химического состава цветной капусты в процессе доращивания. Сб. научных трудов Московского Ордена Трудового Красного Знамени института им. Г. В. Плеханова. Вып. XVII. 1961.
84. Колесник А. А., Пономарев П. Ф. Длительное хранение моркови в полиэтиленовой упаковке. 2-я Всесоюзная конференция по проблемам товароведения продовольственных товаров. Сентябрь 1967 г. Тезисы докладов. Донецк, 1967.
85. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. М., Гостехиздат, 1954.
86. Кочерыжкин В. Г. Физиолого-биологические основы хранения урожая. «Известия АН СССР». Серия биологическая, 1966, № 3.
87. Кретов П. Т. Изменение теплофизических свойств высушиваемых овощей. «Известия вузов. Пищевая технология», 1966, № 4.
88. Круглов С. С., Скоблo А. И. Исследование конвективного теплообмена между гранулированным материалом и потоком газа. «Химия и технология топлив и масел», 1958, № 3.
89. Курылев Е. С., Герасимов Н. А. «Холодильные установки». М., Машгиз, 1961.
90. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
91. Леблон К. Использование контейнеров с пластмассовыми стенками для хранения груш. «Холодильная техника», 1960, № 1.
92. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967.
93. Лыков А. В., Васильева Г. В. Исследование тепло- и массообмена при испарении жидкости из капиллярно-пористого тела. «Инженерно-технический журнал». Т. 14, 1968, № 3.
94. Макашев А. П., Полетаева Н. П., Исагулян Э. А. Опытное хранение яблок в пленочных упаковках и контейнерах. «Холодильная техника», 1964, № 1.
95. Максимов Н. А. Избранные работы по засухоустойчивости и зимостойкости растений. Т. 1. Водный режим и засухоустойчивость растений. М., Изд-во АН СССР, 1952.
96. Максимов Н. А. Краткий курс физиологии растений. М., Сельхозгиз, 1958.

97. Матвеев В. И. Новая система охлаждения трюмов рефрижераторных фруктовозов. «Холодильная техника», 1967, № 2.
98. Машкович И. К. Активное вентилирование при хранении капусты в хранилище. Доклады ТСХА. Вып. 93. «Биология, земледелие и растениеводство», 1969.
99. Мельников А. И. Хранение плодов. Институт экономических исследований и научно-технической информации при Госплане Молдавской ССР, 1963.
100. Метлицкий Л. В. Современные методы хранения сырья на консервных и овощесушильных заводах. М., «Пищевая промышленность», 1966.
101. Метлицкий Л. В. Биохимия хранения сочного растительного сырья. «Вестник Академии наук СССР», 1967, № 1.
102. Метлицкий Л. В. Хранение картофеля в условиях активного вентилирования. М., «Экономика», 1966.
103. Метлицкий Л. В. Биохимические исследования в области хранения сырья. «Консервная и овощесушильная промышленность», 1967, № 12.
104. Метлицкий Л. В. Природа раневых реакций картофеля и их использование для защиты клубней от поражения микроорганизмами. Биохимия плодов и овощей. М., «Наука», 1964.
105. Метлицкий Л. В. Биохимические основы хранения картофеля, овощей и плодов. Биохимия на страже урожая. М., «Наука», 1965.
106. Метлицкий Л. В. Цитрусовые плоды. М., Пищепромиздат, 1955.
107. Моисеев А. М. Теплопроводность яблочного и виноградного соков. «Консервная и овощесушильная промышленность», 1963, № 11.
108. Моисеева Н. А. Хранение яблок в упаковках из полимерных пленок. «Холодильная техника», 1966, № 9.
109. Моисеева Н. А., Голенищева-Кутузова А. А. Применение полиэтиленовой упаковки при длительном хранении яблок. М., ЦИНТИпищепром, 1966.
110. Моисеева Н. А., Россовский Л. С. Хранение молдавского винограда в камерах с кондиционированием воздуха. «Холодильная техника», 1966, № 5.
111. Морозова Н. В., Салькова Е. Г. Изучение кутикулы яблок. Прикладная биохимия и микробиология. Вып. 3. Т. II. М., «Наука», 1966.
112. Мосин М., Толонилов В. Механические повреждения клубней. «Картофель и овощи», 1967, № 1.
113. Морочковский С. Ф. Условия развития кагатной гнили сахарной свеклы и меры борьбы с ней. Киев, Изд-во Киевск. гос. унив., 1950.
114. Муравьев А. И. Критериальные уравнения для расчета тепло- и массообмена в слое мокрой льнотресты при реверсивном движении воздуха через слой. Тепло- и массообмен в сушильных и термических процессах. Минск, «Наука и техника», 1966.
115. Нестеренко А. В. Тепло- и массообмен при испарении жидкости со свободной поверхности. «Журнал технической физики». Вып. 4. Т. XXIV, 1954.
116. Никифоров И. И., Анисимов В. Я. Эффективность транспортирования томатов в химической среде герметически закрытых трюмов речных теплоходов. Прогрессивные методы хранения картофеля, овощей и плодов и улучшение торговли ими. Тезисы докладов на научной конференции 5—8 июля 1966 г. Киев, 1966.
117. «Новое в хранении сахарной свеклы». М., ЦИНТИпищепром, 1962.
118. Опхюз Б. Влияние интенсивности вентиляции на потерю веса картофеля в вентилируемых картофелехранилищах. «Сельское хозяйство за рубежом», 1958, № 11.
119. «Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха». Справочное руководство. Перевод с англ. М., Стройиздат, 1963.
120. Отчет по теме № 24 «Разработка оптимальных режимов хранения овощей в хранилищах с искусственным и естественным воздухообменом для условий Северного Кавказа. Руководитель темы Скорикова Ю. Г. МПП СССР. Краснодарский научно-исследовательский институт пищевой промышленности. Краснодар, 1967.

121. Отчет по теме № 48 «Кондиционирование воздуха на фруктовых холодильниках». Руководитель темы А. А. Гоголин. Всесоюзный научно-исследовательский институт холодильной промышленности. М., 1965.
122. Палилов Н. А. Настойчиво внедрять принудительную вентиляцию. «Картофель и овощи», 1962, № 8.
123. Палилов Н. А., Стариков А. Г. Влияние способов хранения на качество и сохраняемость моркови. «Прогрессивные методы хранения картофеля, овощей и плодов и улучшение торговли ими». Тезисы докладов на научной конференции 5—8 июля 1966 г. Киев, 1966.
124. Попов Н. Г. Себестоимость сахара на предприятиях РСФСР и пути ее снижения. М., ЦИНТИпищепром, 1964.
125. «Прогрессивные методы хранения картофеля, овощей и плодов и улучшение торговли ими». Тезисы докладов на научной конференции 5—8 июля 1966 г. Киев, 1966.
126. Пухальский И. М. Экономическая эффективность разных способов хранения картофеля, капусты и соленых огурцов. «Консервная и овощесушильная промышленность», 1965, № 10.
127. Родин М. Н. Применение активного вентилирования при буртовом хранении капусты. Доклады ТСХА. Вып. 93. «Биология, земледелие и растениеводство», 1963.
128. Рубанюк А. П. О методах исследований размеров естественной убыли свежих плодов и овощей при хранении и транспортировании. «Прогрессивные методы хранения картофеля, овощей и плодов и улучшение торговли ими». Тезисы докладов на научной конференции 5—8 июля 1966 г. Киев, 1966.
129. Рубанюк А. П. О влагоудерживающей способности свежих плодов и овощей. «Товароведение». Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Вып. 2. Киев, «Техника», 1967.
130. Рубин Б. А. Хранение сахарной свеклы. М., Пищепромиздат, 1946.
131. Рубин Б. А. Физиология сельскохозяйственных растений. Том III. Физиология сахарной свеклы. Изд-во Моск. гос. унив., 1968.
132. Рубин Б. А., Арциховская Е. В. Биохимия и физиология растений. М., Изд-во АН СССР, 1961.
133. Рубин Б. А., Любарская Л. С., Гулидова И. В. Физиолого-биохимические особенности сахарной свеклы. М., Изд-во АН СССР, 1960.
134. Рубин Б. А., Метлицкий Л. В. Основы хранения овощей и плодов. М., Изд-во АН СССР, 1955.
135. Рютов Д. Г. Влагообмен в камерах хранения замороженных продуктов. «Холодильная техника», 1954, № 3.
136. Рютов Д. Г. Снижение потерь и повышение качества пищевых продуктов при хранении на холодильниках. «Холодильная техника», 1964, № 4.
137. Рютов Д. Г. Обзор докладов на XII Международном конгрессе по холоду. «Холодильная техника», 1968, № 9.
138. Саатчан А. Предварительное вакуумное охлаждение овощей и плодов. «Холодильная техника», 1959, № 1.
139. Сабуров Н. В. Активное вентилирование при хранении картофеля и капусты. Доклады ТСХА. Вып. 93. «Биология, земледелие и растениеводство», 1962.
140. Сабуров Н. В., Антонов М. В. Хранение и переработка плодов и овощей. М., Сельхозгиз, 1962.
141. Сабуров Н. В., Антонов М. В., Широков Е. П. Хранение и переработка плодов и овощей. М., Сельхозгиз, 1963.
142. Сабуров Н. В., Гусейнов А. Г. Длительное хранение яблок в упаковке из полиэтиленовой пленки. М., ЦИНТИпищепром, 1966.
143. Садковский В. Г. Активное вентилирование сахарной свеклы. «Сахарная промышленность», 1958, № 11.
144. Садковский В. Г. Активная вентиляция свеклы в кагатах. «Сахарная промышленность», 1961, № 2.

145. Салькова Е. Г. Биохимические аспекты предупреждения физиологических заболеваний плодов при газовом хранении. Доклады II Международного конгресса по вопросам науки и технологии пищевой промышленности. М., 1966.
146. Салькова Е. Г. Биохимические аспекты хранения плодов в упаковке из полимерных пленок. М., ЦИНТИпищепром, 1966.
147. Силин П. Технология свеклосахарного и рафинадного производства. М., Пищепромиздат, 1957.
148. Синцеров А. Д. Вентиляционные и пневмотранспортные установки элеваторов и предприятий по переработке зерна. Ч. 1. М., Пищепромиздат, 1959.
149. Сокол П. Ф. Хранение картофеля. М., Сельхозгиз, 1963.
150. Сокол П. Ф. Хранение картофеля и овощей. (на укр. яз.). Киев, «Урожай», 1968.
151. Сокольский А. Н. О скорости сгорания пыли. Сб. «Исследование процессов горения натурального топлива». М., Госэнергоиздат, 1948.
152. Соломийчук С. О. К вопросу улучшения условий хранения овощной зелени. 2-я Всесоюзная конференция по проблемам товароведения продовольственных товаров. Сентябрь 1967 г. Тезисы докладов. Донецк, 1967.
153. Спенсер-Грегори Р., Роурке Е. Гигрометрия. Перев. с англ. М., Металлургиздат, 1963.
154. Справочник сахарника под редакцией Лепешкина И. П. М., Пищепромиздат, 1963.
155. Субботин В. А., Попков В. П. К вопросу о теплофизических свойствах винограда и продуктов его переработки. «Труды Всесоюзного научно-исследовательского института виноградарства и виноделия». Т. XV. Магарач, 1967.
156. Технология сахара. Перев. с нем. под редакцией П. С. Силина. П., Пищепромиздат, 1958.
157. «Технология свеклосахарного производства». Перев. с англ. М., Пищепромиздат, 1958.
158. Тимирязев К. А. Сочинения. Т. III. М., Сельхозгиз, 1937.
159. Тимофеев В. Н. Теплообмен в слое. «Известия Всесоюзного теплотехнического института», 1949, № 2.
160. Третьяков А. Типовые проекты хранилищ. «Картофель и овощи», 1967, № 9.
161. Троицкий И. Вентилирование буртов картофеля. «Картофель и овощи», 1965, № 12.
162. Указания по методике теплотехнического расчета хранилищ для картофеля и овощей. Госстрой СССР. Главстройпроект. М., 1966.
163. Федоренко А. А. Распределение воздуха в насыпи картофеля, хранимого в условиях активной вентиляции. Прогрессивные методы хранения картофеля, овощей и плодов и улучшение торговли ими. Тезисы докладов на научной конференции 5—8 июля 1966 г. Киев, 1966.
164. Федоров И. М. Теория и расчет процесса сушки. М., Госэнергоиздат.
165. Федоров М. В. Химизм процессов дыхания по современным данным. Известия ТСХА. Биология. Вып. X, 1954.
166. Фелонин В. Н. О проектировании хранилищ картофеля и овощей для Западной Сибири. Академия строительства и архитектуры СССР. Западно-Сибирский филиал. Труды. Вып. 4. Новосибирск, 1960.
167. Филоненко Г. К. Равновесная влажность пищевых продуктов. «Инженерно-технический журнал». Т. XIII, 1967, № 1.
168. Франчук А. И. Исследования по строительной теплотехнике и климатологии. М., Стройиздат, 1962.
169. Фридман О. Е., Селюк И. А. Справочник по заготовке, приемке и хранению сахарной свеклы. М., Пищепромиздат, 1964.
170. Хелемский М. З. Хранение сахарной свеклы. М., Пищепромиздат, 1964.
171. Хикс Э. В. Сборник докладов 9-го Международного конгресса по холоду. М., 1958.
172. Холмквист А. А. Как хранить картофель. Лениздат, 1963.

173. Холодильная техника. Энциклопедический справочник. Т. 2. М., Госторгиздат, 1961.
174. Церевитинов В. Ф. Химия свежих плодов и овощей. М., Сельхозгиз, 1933.
175. Чечеткин А. В. Высокотемпературные теплоносители. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
176. Чижов Г. Б. Метод вычисления теплофизических характеристик пищевых продуктов при отрицательных температурах на основании закона Рауля. «Холодильная техника», 1966, № 10.
177. Чубик И. А., Маслов А. М. Справочник по теплофизическим константам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М., Пищепромиздат, 1965.
178. Шапиро Д., Голомштоk М. Хранение капусты в траншеях с охлаждаемым дном. «Картофель и овощи», 1962, № 9.
179. Шаффер Г. Охлаждение овощей в Англии. «Сад и огород», 1959, № 9.
180. Шепелев И. А. Естественные конвективные токи вблизи источников тепла (плоская задача). НИИсантехники. «Кондиционирование воздуха». Сб. 15. М., Госстройиздат, 1963.
181. Шепс Н. Ф. Новые методы хранения картофеля, овощей, яблок и квашеной капусты. М., Госторгиздат, 1954.
182. Широков Е. П. Хранение капусты. М., «Московский рабочий», 1961.
183. Широков Е. П. О возможности охлаждения капусты при активном вентилировании воздухом с отрицательной температурой. НТО Стройиндустрии. «Отопление и вентиляция производственных, сельскохозяйственных зданий». Тезисы докладов. М., Госстройиздат, 1967.
184. Широков Е. П., Волосов Ю. Как сохранить картофель и овощи зимой. «Картофель и овощи», 1968, № 10.
185. Шмалько В. Как бороться с отпотеванием и увяданием картофеля и овощей. «Картофель и овощи», 1962, № 8.
186. Штаерман Н. Я. Основы строительного дела в пищевой промышленности. М., Пищепромиздат, 1949.
187. Шуметов Г. Потери картофеля при хранении. «Картофель и овощи», 1965, № 12.
188. Air Conditioning Refrigerating Data Book. Refrigeration Applications. The American Society of Refrigerating Engineers, 1958, Vol. 1, N 1.
189. Andress. „Zeitschrift für die Zuckerindustrie", 1957, N 6.
190. Businger J. A. Luchtbehaideling van Produkten in gestorte toestaund. „Ver warming en Ventilate", 1954, N 11.
191. Chainit O. Die Steuerung des Zuckers in Rubo. „Zeitschrift für die Zuckerindustrie", 1954, N 12.
192. Claycomb R. S., Rabe F. M. Envelope circulation for Potato storages Transactionist. „ASHRAE Journal", 1962, vol. 5. N 5.
193. Cooper T. S. The Application of Refrigeration to the Bacon Industry. „The Journal of Refrigeration", 1967, vol. 10, N 11.
194. Green W. USA Department of Agriculture. „Technical Bulletin", 1941, N 771.
195. Gore H. USA Department of Agriculture. „Chemistry Bulletin", 1942.
196. Guillon R., Richardson H. Humiditys valuable role in keeping produce cool. „Produce marketing", 1965, Feb.
197. Herbert J. T. Controlled atmosphere stores for fruit. Part. 1. „World Refrigeration", 1966, 17, N 3.
198. Hunter J. Studies show value of forced air ocutilation for potato storages. „American Potato Journal", 1960, Vol. 37, N 5, May.
199. Hugh W., Smith B. The Production of Carbon Dioxide and metabolic Heet by Horticultural Produce. „Modern Refrigeration", 1957, N 12.
200. Kidd F., West C. Dept. Sci. Ind. Res. Food. Juwest Board Rep. 1933.
201. Layer J., Boyd Z. L., Hannes B. Potato storage oculation Agricultural. Eng. 1954. Vol. 35, N 3.
202. Leonard E. R. Ann. Bot.. 1939, N 3.
203. Mauch A. Ban. Einrichtung unb Betrieb von Obstlagerhäsern. „Die Kalte". 1974, Mai.

204. Nelson K., Gnillson R. Highly marketable gropes maintained by controled humidity. „ASHRAE Journal", 1960, April.
205. Ophuss B. G. The Effect of vertilation capasition weight Losses in ventilubed potato Stores. 1957.
206. Plank R. „Bull. Internat. Inst. Refrigeration", 1959. N 3.
207. Pieniazek S. A. „Amer. Society Hort Sci. Poc." 1953, 42.
208. Renier J., Morin W. „Bull. Internat. Inst. Refrigeration", 1931, N 1, 425.
209. Schmidt L., Havranek A., Zahrdnicek J., Vorlickova B. Scladoaci Ztraty na Tovarnich u skladach. „Listy cucrovarn", 1965, N 12.
210. Scott R. Respiration tu bulky plant tissue. Doct. Thesis, Univ. of Cambridge, England, 1950.
211. Seybold A. Die physikalische Komponente der Pflauslichen Transpiration. Berlin, 1929.
212. Smock P. M. „Bot. Review", 1944, 10.
213. Worthingston-Smith. Fruit pre-cooling in storage chamber. „Australian Refrigeration Air Conditioning and Heating", 1967, December.
214. Vajna S. Die Vervahrung der Zuckerrüben. „Zeitschrift für die Zuckerindustrie", 1957, 8.
215. Vajna S. Die Vervahrung wascher Rübe. „Zeitschrift für die Zuckerindustrie", 1958, N 4.
216. Vajna S. Die Vervahrung der Zuckerrüben, Berlin, 1962.
217. Vajna S. Die vergrösserung der Rüben arbeitung mit demMethode der saisonverlaugerung. „Zeitschrift für die Zuckerindustrie", 1958, N 6.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . . 3
Условные обозначения . . . . . 6

**Глава I. Теплофизические характеристики плодов и овощей** . . . . 7

Состояние вопроса . . . . . 7
Некоторые теоретические исследования . . . . . 9
Связь удельной теплоемкости плодов и овощей с их химическим составом . . . . . 9
Зависимость упругости водяного пара над клеточным соком плодов и овощей от их криоскопической температуры . . . . . 10
Количество воды, вымерзающей в плодах и овощах при данной отрицательной температуре . . . . . 12
Энтальпия пищевых продуктов . . . . . 13
Истинная и физическая плотность пищевых продуктов. Пористость продуктов . . . . . 13
Насыпная плотность плодов и овощей . . . . . 15
Температуропроводность и теплопроводность плодов и овощей . . 16
Основные результаты и выводы . . . . . 19

**Глава II. Закономерности влагообмена при охлаждении и хранении сочного растительного сырья** . . . . . 19

Роль влажностного режима при хранении сырья . . . . . 19
Механизм влагообмена плодов и овощей с воздухом . . . . . 24
Закономерности влагообмена при охлаждении сырья . . . . . 35
Закономерности влагообмена при хранении сырья . . . . . 36
Методика расчета влаговыделений плодов и овощей при охлаждении и хранении . . . . . 40
Нижний предел влаговыделений плодов и овощей при холодильном хранении . . . . . 48
Закономерности естественной убыли массы плодов и овощей . . . 49
Основные результаты и выводы . . . . . 53

**Глава III. Исследование и методика расчета процессов кондиционирования воздуха в хранилищах** . . . . . 55

Закономерности формирования температурного и влажностного полей в насыпи сырья . . . . . 55
Оптимальное соотношение между явным и скрытым теплом при отводе энергии дыхания воздухом . . . . . 68
Обоснование оптимальной влажности вентилирующего воздуха . . 70
Расчет физиологического тепла, выделяемого плодами и овощами за период охлаждения . . . . . 71
Влияние температуры и физического состояния сырья на потери сухих веществ и интенсивность дыхания . . . . . 73
Темп самосогревания сырья . . . . . 75
Расчет интенсивности активного вентилирования и продолжительности охлаждения сырья при использовании естественного и искусственного холода . . . . . 81

Методика расчета безопасных режимов охлаждения плодов и овощей воздухом низкой отрицательной температуры . . . . . 87
Основные результаты и выводы . . . . . 93

Глава IV. **Современное состояние и пути совершенствования техники хранения сочного растительного сырья** . . . . . 94

Оптимальные условия отвода физического и физиологического тепла 94
Избыточное вентилирование сырья . . . . . 98
Классификация и сравнительная оценка существующих способов хранения плодов и овощей . . . . . 100
Преимущества и недостатки системы активного вентилирования . . 109
Сравнительная оценка поперечной и продольной схем активного вентилирования . . . . . 113
Пути совершенствования техники хранения плодов и овощей . . . 114
Основные результаты и выводы . . . . . 116

Глава V. **Кондиционирование воздуха при хранении некоторых видов сырья** . . . . . 118

Совершенствование техники хранения сахарной свеклы . . . . 118
Прямоточно-рециркуляционная система активного вентилирования свекловичных кагатов . . . . . 118
Хранение сахарной свеклы при кондиционировании приточного воздуха по влажности . . . . . 123
Гравитационная система вентилирования сырья . . . . . 129
Физическая сущность и особенности системы . . . . . 129
Эффективность контактной гравитационной системы вентилирования при хранении моркови . . . . . 136
Бесконтактная гравитационная система вентилирования сырья . . 137
Основные результаты и выводы . . . . . 141
Заключение . . . . . 142
Список использованной литературы . . . . . 144

*ВИКТОР ЗАХАРЬЕВИЧ ЖАДАН*

**Теоретические основы кондиционирования воздуха при хранении сочного растительного сырья**

Редактор *Т. В. Гундарова*
Художник *Б. М. Разин*
Худож. редактор *С. Р. Нак*
Техн. редактор *Г. Г. Хацкевич*
Корректоры *Н. С. Козлова, В. Б. Грачева*

Т-09830 Сдано в набор 23/XII 1971 г. Под. к печ. 31/V 1972 г.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типограф. № 3. Объем 9,75 п. л.
Уч.-изд. л. 10,14. Тираж 2500 экз. Цена 1 р. 02 к.
**Заказ 125а**
Издательство «ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ».
Москва, 113035, 1-й Кадашевский пер., 12

Московская типография № 19 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР,
наб. Мориса Тореза, 34