

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ВОЗДУХА В ГИПОБАРИЧЕСКОМ ХРАНИЛИЩЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

В гипобарических хранилищах сельскохозяйственной продукции в большинстве процессов их эксплуатации имеют место колебания абсолютного давления среды, связанные с особенностями работы оборудования (вакуумных насосов), обеспечивающего хранилище свежим воздухом. Это в определенной степени влияет на температурно-влажностные параметры среды. При колебаниях давления изменения термодинамических характеристик воздуха может вызывать испарение влаги из хранимой продукции или ее конденсацию, что в первом случае приводит к усушке продукции, а во втором — к выпадению капельной влаги на ее поверхности и загниванию продукции. В обоих случаях итог один — продукция приходит в негодность. На состояние среды влияет также интенсивность теплообмена с окружающей средой, наличие источников тепловыделения и т. п. Целью настоящей работы является изучение характера изменения термодинамических характеристик воздуха в зависимости от колебания абсолютного давления среды в гипобарическом хранилище с привлечением экспериментальных данных [1] (например, аналогичных представленным на рис. 1) и параметров, характеризующих гипобарический способ хранения сельскохозяйственной продукции. Эти исследования необходимы также для получения исходных данных при конструировании гипобарических хранилищ и разработки соответствующих технологических инструкций по их эксплуатации. При этом были развиты методы расчета тепловлажностных параметров воздуха при давлениях отличных от атмосферного Кремнева О. А., Журавленко В. Я. [2] применительно к условиям гипобарического хранения сельскохозяйственной продукции.

Учитывая сложность протекающих теплофизических процессов в среде гипобарического хранилища, рассмотрим упрощенную физическую модель вентиляции его воздухом [2]. В какой-то момент времени вакуумный насос откачал из камеры хранения воздух до заранее заданного абсолютного давления (нижний предел регулирования давления). Затем в камеру хранения из атмосферы подается вентилирующий воз-

дух. Ввиду загроможденности камеры тарой с продукцией можно принять, что воздух, первоначально находившийся в объеме камеры, не смешивается с вновь поступившим, а сжимается им как поршнем. В результате происходит разогрев сжимаемого воздуха. При этом воздух увлажняется за счет испарения влаги из окружающей среды и от продукции. Таким образом, происходит процесс политропного сжатия воздуха с его увлажнением. С достижением в камере хранения заданного давления включается вакуумный насос; из камеры частично удаляется воздух. Часть воздуха, которая осталась в камере, можно рассматривать как расширяющуюся от объема, который она занимала до включения вакуумного насоса, до полного объема камеры. Протекающий процесс расширения воздуха является политропным с понижением температуры и выделением влаги.

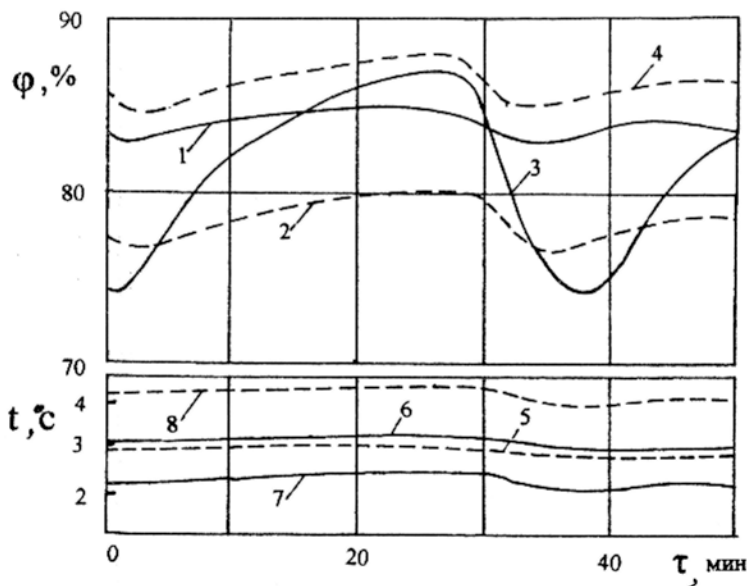


Рис. 1. Температурные и влажностные условия в баромодуле с продукцией: датчик влажности № 1 (линии 1 и 5) установлен в середине контейнера с продукцией; датчик влажности № 2 (линии 2 и 6) установлен в контейнере около стенки; датчик влажности № 3 (линии 3 и 7) расположен вне контейнеров в баромодуле; датчик влажности № 4 установлен в середине второго контейнера с продукцией (линии 4 и 8). 10 день хранения. Объем контейнера $\sim 0,2 \text{ м}^3$. При хранении давление изменялось в пределах $(16 - 18,35) \cdot 10^3 \text{ Па}$.

Предлагаемая модель условна, но она позволяет описать и проанализировать изменение параметров воздуха в барокамере. Кроме того, описанная картина может быть весьма близка к реальной в локальных, наиболее загроможденных местах барокамеры.

Процессы сжатия и расширения воздуха в гипобарическом хранилище сельскохозяйственной продукции сопровождаются фазовыми переходами содержащейся в нем влаги. В этой связи при термодинамическом анализе процесса изменения давления в камере будем рассматривать расход теплоты на увлажнение или выделение теплоты при конденсации как внешнюю теплоту политропного процесса. Воздух с содержащимися в нем парами воды будем считать идеальным газом. Изменение свойств воздуха в зависимости от добавления в процессе сжатия некоторого количества пара может быть в случае необходимости учтено усреднением значений теплоемкости и газовой постоянной. Составим уравнение, описывающее рассматриваемый политропный процесс, исходя из дифференциального уравнения первого закона термодинамики для идеального газа [2, 3]

$$dQ = dU + p \cdot dv, \quad (1)$$

где dQ — количество подведенной или отведенной теплоты в политропном процессе; dU — изменение внутренней энергии воздуха.

Решим задачу в общем виде. Подвод или отвод теплоты обусловлен конденсацией или испарением влаги при изменении влагосодержания x . С учетом $dU = c_v \cdot dT$ получим

$$r dx = c_v \cdot dT + p \cdot dv, \quad (2)$$

где $r dx$ — может иметь положительный или отрицательный знак.

Величину dv определим из уравнения Клайперона $p v = R T$.

Отсюда

$$dv = R \cdot \frac{p \cdot dT - T \cdot dp}{p^2}. \quad (3)$$

Тогда исходное дифференциальное уравнение (1) примет вид [2]

$$r \cdot dx = c_v \cdot dT + R \cdot \left(dT - T \frac{dp}{p} \right) \quad (4)$$

или с учетом $c_v \approx c_p - R$

$$r \cdot dx = c_p \cdot dT - R \cdot T \frac{dp}{p}. \quad (5)$$

Определим зависимость температуры среды в гипобарическом хранилище при изменениях абсолютного давления во времени. Для упрощения анализа процессов, происходящих, например, при сжатии воздуха, положим, что закон изменения влагосодержания во времени имеет вид (при малых изменениях x [2])

$$x = x_1 + \frac{\Delta x}{\Delta \tau} \cdot \tau, \quad (6)$$

а закон изменения давления описывается выражением

$$p = p_1 + \frac{\Delta p}{\Delta \tau} \cdot \tau, \quad (7)$$

где x_1 и p_1 — влагосодержание и давление воздуха в начальный момент времени; $\frac{\Delta x}{\Delta \tau}$ и $\frac{\Delta p}{\Delta \tau}$ — скорости изменения влагосодержания и давления, которые на малом промежутке времени могут считаться постоянными.

При этом ввиду расхода теплоты на испарение влаги при сжатии воздуха знак перед gdx в выражении (5) отрицательный.

Согласно (6) и (7) имеем

$$dx = \frac{\Delta x}{\Delta \tau} \cdot d\tau \quad (8)$$

и

$$dp = \frac{\Delta p}{\Delta \tau} \cdot d\tau. \quad (9)$$

После подстановки выражений (6) и (7) в уравнение (5) получим:

$$-\frac{r \cdot \Delta x}{\Delta \tau \cdot R} = \frac{c_p}{R} dT - \frac{T \cdot d\tau}{\left(\frac{\Delta \tau \cdot p_1}{\Delta p} + \tau \right)}. \quad (10)$$

$$\text{Обозначим } -\frac{r \cdot \Delta x}{\Delta \tau \cdot R} = A, \quad \frac{c_p}{R} = B, \quad \frac{\Delta \tau \cdot p_1}{\Delta p} = C. \quad (11)$$

Тогда уравнение (10) примет вид

$$\frac{dT}{d\tau} - T \cdot f(\tau) = \frac{A}{B}, \quad (12)$$

$$\text{где } f(\tau) = \frac{1}{B \cdot (C + \tau)}.$$

Общий интеграл дифференциального уравнения (12) находится по формуле [4]

$$T = e^{\int f(\tau) d\tau} \left[\frac{A}{B} \cdot \int e^{-\int f(\tau) d\tau} d\tau + K \right]. \quad (13)$$

Здесь

$$\int f(\tau) d\tau = \int \frac{d\tau}{B \cdot (C + \tau)} = \frac{1}{B} \cdot \ln B(C + \tau).$$

Тогда

$$T = e^{\frac{1}{B} \ln B(C + \tau)} \left[\frac{A}{B} \cdot \int e^{-\frac{1}{B} \ln B(C + \tau)} d\tau + K \right].$$

При этом

$$e^{\frac{1}{B} \ln B(C + \tau)} = [B \cdot (C + \tau)]^{\frac{1}{B}}$$

и

$$\frac{A}{B} \int [B \cdot (C + \tau)]^{-\frac{1}{B}} d\tau + K = \frac{A}{B} \cdot \frac{[B \cdot (C + \tau)]^{1-\frac{1}{B}}}{B-1} + K. \quad (14)$$

Выполняя интегрирование получим выражение для температуры T в общем виде

$$T = \frac{A}{B-1} \cdot (C + \tau) + [(C + \tau) \cdot B]^{\frac{1}{B}} K. \quad (15)$$

Для начальных условий при $\tau = 0$ и $T = T_1$ получим

$$K = T_1 \cdot (C \cdot B)^{-\frac{1}{B}} - \frac{A}{B-1} \cdot C \cdot (C \cdot B)^{-\frac{1}{B}}. \quad (16)$$

Представляя константу интегрирования K в выражение (15) имеем

$$T = \frac{A}{B-1} \cdot (C + \tau) + T_1 (C + \tau)^{\frac{1}{B}} \cdot C^{-\frac{1}{B}} - (C + \tau)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{A}{B-1} \cdot C^{-\frac{1}{B}}. \quad (17)$$

С учетом принятых обозначений (11) раскроем значения постоянных A , B и C в выражении (17).

$$T = T_1 \left(1 + \frac{\tau \cdot \Delta p}{\Delta \tau \cdot p_1} \right)^{\frac{R}{c_p}} - \frac{r \cdot \Delta x}{\Delta \tau \cdot (c_p - R)} \left[\left(\frac{\Delta \tau \cdot p_1}{\Delta p} + \tau \right) - \frac{p_1 \cdot \Delta \tau}{\Delta p} \left(1 + \frac{\tau \cdot \Delta p}{\Delta \tau \cdot p_1} \right)^{\frac{R}{c_p}} \right]. \quad (18)$$

Для воздуха при изменении его состояния без изменения влагосодержания в политропном процессе ($\Delta x = 0$) из выражений (8—18) получаем

$$T = T_1 \cdot \left(1 + \frac{\tau \cdot \Delta p}{\Delta \tau \cdot p_1} \right)^{\frac{R}{c_p}}. \quad (19)$$

Рассмотрим выражения (18) и (19) для момента времени, соответствующего завершению политропного процесса (состояние "2"). Здесь Δp — максимальная амплитуда изменения давления; Δx — разность влагосодержаний в состояниях среды "1" и "2". Для конечного момента времени можно положить $\Delta \tau = \tau$.

Тогда выражение (18) перепишется в виде

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - r \cdot \frac{\Delta x}{c_p - R} \left[\frac{p_1 + \Delta p}{\Delta p} - \frac{p_1}{\Delta p} \left(1 + \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]. \quad (20)$$

А выражение (19) в виде

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}}, \quad (21)$$

то есть как и следовало ожидать процесс изменения состояния воздуха описывается уравнением адиабаты.

В выражениях (18) и (20) параметры $\Delta \tau$, Δp , p_1 , Δx считаются известными величинами для данного политропного процесса; в частности они могут быть найдены из опыта.

В гипобарическом хранилище сельскохозяйственной продукции при изменении температуры среды (за счет колебаний давления) и отличии ее от температур окружающей воздушной среды в холодильной камере и хранимой продукции между ними возникает теплообмен. Выражения (20) и (21) определяют температуру разреженного воздуха в хранилище без учета теплообмена. Он может быть учтен в косвенном виде добавлением члена $q \cdot d\tau$ в исходное уравнение (10), где q — сток (при повышении давления) или источник (при понижении давления) теплоты; размерность q — Вт на кг разреженного воздуха. Тогда уравнение (10) перепишется в виде

$$-\left(\frac{r \cdot \Delta x}{\Delta \tau \cdot R} + q \right) d\tau = \frac{c_p}{R} dT - T \cdot \frac{d\tau}{\left(\frac{\Delta \tau \cdot p_1}{\Delta p} + \tau \right)}. \quad (10)^*$$

$$A^* = -\frac{r \cdot \Delta x}{\Delta \tau \cdot R} + q.$$

Решение уравнения (10)* для температуры воздуха в момент завершения политропного процесса изменение его состояния имеет вид

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \frac{r \cdot \Delta x + q \cdot \tau}{c_p - R} \left[\frac{p_1 + \Delta p}{\Delta p} - \frac{p_1}{\Delta p} \left(1 + \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]. \quad (20)^*$$

С помощью зависимостей (20) и (20)* оценим характер проявления последствий сжатия и расширения среды в действующем гипобарическом хранилище сельскохозяйственной продукции (табл.).

Характер зависимостей (20) и (20)* свидетельствует о том, что с повышением давления как и в опытах в результате протекающих процессов изменения состояния среды увеличивается ее температура, что свидетельствует об адекватности предлагаемой физической модели.

Расчеты по формуле (20) дают повышенные значения температур T_2 .

Расчетные значения параметров по формулам (20) и (20)*

| Опытные данные | Из опыта | | Расчет по формуле (20) T_2 , К | Расчет по формуле (20)* q , Вт/кг |
|---------------------------------|-----------|-----------|-------------------------------------|--|
| | T_1 , К | T_2 , К | | |
| из [1] | 277,15 | 277,65 | 284 | 7,46 |
| из [1] | 277,15 | 277,45 | 286,58 | 16,57 |
| обработка линий 3 и 7 на рис. 1 | 277,25 | 277,55 | 281,12 | 3,36 |

Зависимость (20)* позволяет провести оценку реальной теплофизической обстановки в гипобарическом хранилище, в частности определить величину q , при которой опытные и расчетные значения температур T_2 становятся близки; расчетные значения q приведены в табл. В условиях гипобарического хранения сельскохозяйственной продукции коэффициенты интенсивности конвективного теплообмена находятся в пределах $\sim (2-6)$ Вт/м²·К, температурные перепады между разреженным воздухом и окружающей средой $\Delta t_p \sim (0,05-0,5)$ °С. В этой связи для рассчитанных значений q (см. табл.) будут соответствовать площади теплообмена на 1 кг разреженного воздуха в пределах 5—30 м², что согласуется с условиями в промышленном гипобарическом хранилище [1].

Самостоятельное определение величины q представляет значительные трудности. Она зависит от конструктивных элементов хранилища

(их площади и массы), от количества продукции (ее поверхности и массы) и многих других факторов. Кроме того, в нестационарных процессах изменения температуры разряженного воздуха непостоянен температурный напор Δt_p . В целом величина q является переменной и ее закон изменения может быть отличным даже в разные периоды хранения.

При анализе температурно-влажностной обстановки в гипобарическом хранилище следует помнить, что возможны локальные пространства, где закономерности изменения температуры будут полностью ха-

рактеризоваться зависимостью (20). В этой связи может быть рассмотрена задача, а какие должны быть параметры Δp и p_1 — технологические параметры гипобарического хранения, чтобы колебания температуры были минимальные; предположим такие, что теплообмен с окружающей средой отсутствует ($q = 0$). На рис. 2 построены кривые зависимостей $\Delta p = f(p_1)$ согласно выражения (20) при раз-

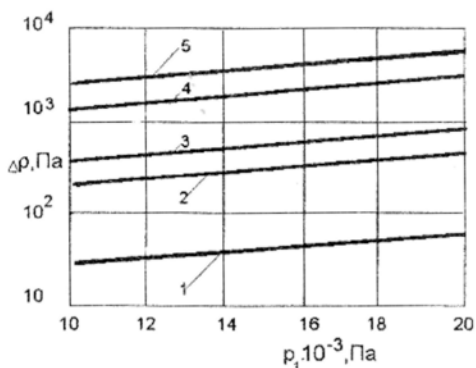


Рис. 2. Зависимость $\Delta p = f(p_1)$ согласно выражения (20) при различных значениях T_1/T_2 : 1 – 5 соответственно равно 0,999; 0,994; 0,98; 0,97 и 0,93

личных параметрах T_1/T_2 . Видно, что для области давлений, характерной для гипобарического способа хранения, достижение температур T_2 близких к T_1 возможно при малых Δp , которые не могут быть обеспечены системой автоматического управления. В реальных условиях можно обеспечить регулирование параметра T_1/T_2 в пределах 0,98 – 0,94. Так, при температуре $T_1 = 274,15$ К значение T_2 изменяется в интервале значений (279,7 ÷ 291,6) К (или $(T_2 - T_1) - (5,6 \div 17,5)$ К). За счет эффекта повышения влагосодержания среды разность величин $T_2 - T_1$ согласно расчетов может быть ниже на (15—30)%. С целью предотвращения достижения воздушной средой повышенных температур T_2 должен быть обеспечен надежный отвод теплоты от сжимаемого воздуха, что выполняется в гипобарических хранилищах.

Из полученных результатов можно сделать следующий вывод. В гипобарическом хранилище колебания температуры в объеме хранилища связаны с режимом работы вакуумного насоса и объясняются особенностями протекающих термодинамических процессов.

При гипобарическом хранении сельскохозяйственной продукции процессы сжатия-расширения среды, вызываемые работой вакуумных насосов и приводящие к периодическому изменению температуры в хранилище, являются причиной возникновения теплопритоков к хранимой продукции от воздуха. Так, при сжатии воздуха и повышении его температуры испарение в него влаги происходит в значительной мере за счет влагоотдачи от продукции, что приводит к ее усушке. Следовательно, колебания абсолютного давления могут быть причиной убыли массы продукции. Появление такого механизма процесса усушки продукции в большей мере характерно для гипобарических условий ее хранения и зависит в основном от режимов работы вакуумного насоса. Можно констатировать, что в гипобарическом хранилище наряду с потоками трансмиссионной и физиологической теплоты [5] имеет место дополнительный поток теплоты, источником которой служат процессы сжатия-расширения среды. Защитой от действия дополнительного источника теплоты могут быть следующие мероприятия: поддержание постоянного давления хранения (отсутствуют колебания давления в гипобарическом хранилище), малый диапазон изменения давления (меньшие отличия температур в процессах сжатия-расширения воздуха), большой временной интервал моментов включения вакуумного насоса (меньше расход вентилирующего воздуха), подготовка вентилирующего воздуха в соответствии с изменениями температуры в барокамере.

Литература

1. Писарев В. Е., Вараевкин В. П., Бойко В. С. Температурные и влажностные условия в гипобарическом хранилище цветочного среза // Холодильная техника. — 1990. — № 1. — С. 20—22.
2. Кремнев О. А., Журавленко В. Я. Тепло- и массообмен в горном массиве и надземных сооружениях. — К.: Наукова думка, 1986. — 341 с.
3. Кафаров В. В. Основы массопередачи. — М.: Высшая школа, 1979. — 436 с.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1963. — 719 с.
5. Жадан В. З. Влагообмен в плодовоовощехранилищах. — М.: Агропромиздат, 1985. — 197 с.