СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ НАСЫПИ ОВОЩЕЙ, УСТАНОВЛИВАЮЩЕГО ОПТИМАЛЬНЫЕ СОЧЕТАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ХРАНИЛИЩЕ СЕКЦИОННОГО ТИПА

IMPROVING THE CALCULATION OF THE PROCESS OF COOLING THE MOUND OF VEGETABLES, ESTABLISHING THE OPTIMAL COMBINATIONS OF PARAMETERS OF ACTIVE VENTILATION IN THE STORAGE OF SECTION TYPE

Получены новые сведения, обеспечивающие высокую сохранность овощной продукции при оптимальном сочетании конструктивных и режимных параметров системы «вентиляция–насыпь» с горизонтальной подачей охлаждающего воздуха в основание насыпи. Рассматриваются варианты решения вентиляции с напольными каналами и бесканальная вентиляция с расположением приточных отверстий вне контура грузового объема.

Ключевые слова: секция, овощехранилище, насыпь, канальная вентиляция, бесканальная вентиляция, охлаждение, температура, микроклимат, обеспеченность.

The article presents the study results aimed at ensuring high safety storage of vegetable products with optimal combination of constructive and regime parameters of the «ventilation–mound» system with a horizontal flow of cooling air into the base of the mound. The author considers variants of solving the ventilation task, namely, ventilation with floor ducts and ductless ventilation with supply openings located outside the contour of the cargo volume.

Keywords: section, vegetable storage, mound storage, ducted ventilation, ductless ventilation, cooling, temperature, micro-climate, security.

Знаковым достижением отечественной науки в области длительного хранения различной овощной продукции массового спроса считаются методики, позволяющие рассчитывать нестационарные многомерные процессы охлаждения биологически активной продукции с внутренним источником теплоты [1]. При этом для размещения насыпей с различным видом овощей широко используются хранилища секционного типа, что позволяет также регулировать требуемую температуру подаваемого воздуха за счет

использования естественного холода в осенний период [2].

Для организации активной вентиляции в каждой секции овощехранилища могут быть применены варианты решения с горизонтальной подачей воздуха в основание насыпи (рис. 1), которые предотвращают засорение приточных отверстий растительными отходами.

При реализации канальной вентиляции по схеме рис. 1, а требуется выполнить условие безопасной ее эксплуатации — по возможности увеличивать расстояние между напольными канала-

ми. Для этого необходимо выявить оптимальные сочетания расчетных конструктивных и режимных параметров системы «вентиляция–насыпь», при которых обеспечивается микроклимат хранения овощей при максимальном расстоянии между воздухораспределительными каналами.

Большим преимуществом вентиляции по схеме рис. 1, б, предложенной в СПбГАСУ [3], является отсутствие каких-либо воздухораспределительных каналов в контуре размещения насыпи овощей, сформированной в секции. Кроме этого, высота приточной решетки b_0 , м, не ограничивается, что позволяет в широких пределах изменять расход подаваемого воздуха и скорость истечения потока из щелевых отверстий, которая не должна превышать 1,5 м/с. Для выявления эффективности процесса охлаждения овощной продукции при бесканальной вентиляции требуется иметь результаты исследования динамики формирования поля скоростей и температур в насыпи при изменении расстояния l , м, от источника истечения потока воздуха.

В работе [4] доказано, что при движении потока воздуха в пределах контура плотного слоя овощей число Re не превышает 400 и крупномасштабные вихри не наблюдаются. Характер движения можно считать потенциальным. Поэтому

уравнение неразрывности Лапласа записывается в виде

$$\Delta \bar{\varphi} = 0. \quad (1)$$

Экспериментально установлено, что при капиллярной модели движения воздуха через пористый слой овощей имеет место линейная зависимость давления от скорости [5], которая записывается в векторной форме

$$\bar{\omega} = -V \bar{\varphi}, \quad (2)$$

где $\bar{\varphi}$ — относительный потенциал скорости: $\bar{\varphi} = 2 \cdot \varphi / \alpha_v \cdot \omega_0 \cdot l$ — для схемы рис. 1, а; $\bar{\varphi} = \varphi / \alpha_v \cdot \omega_0 \cdot l$ — для схемы рис. 1, б; α_v — коэффициент теплоотдачи с единицы объема насыпи, Вт/(м³·°C).

При горизонтально направленном двухмерном потоке с граничными условиями, соответствующими схемам рис. 1, решение системы (1), (2) имеет вид [6]:

$$\bar{\varphi} = \frac{2}{H} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\operatorname{ch} \lambda_k (1 - \bar{x})}{\lambda_k^2 \operatorname{sh} \lambda_k} \cdot \sin \lambda_k \bar{y}_0 \cos \lambda_k \bar{y}. \quad (3)$$

Отсюда составляющие скорости для двухмерного течения следующие:

$$\bar{\omega}_x = \frac{2}{H} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\operatorname{sh} \lambda_k (1 - \bar{x})}{\lambda_k \operatorname{sh} \lambda_k} \cdot \sin \lambda_k \bar{y}_0 \cos \lambda_k \bar{y}; \quad (4)$$

$$\bar{\omega}_y = \frac{2}{H} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\operatorname{ch} \lambda_k (1 - \bar{x})}{\lambda_k \operatorname{sh} \lambda_k} \cdot \sin \lambda_k \bar{y}_0 \sin \lambda_k \bar{y}; \quad (5)$$

Рис. 1. Схемы вентиляции секции овощехранилища: а — с напольными каналами; б — бесканальная; H — высота насыпи продукции, м; $l/2$ (а) и l (б) — глубина расчетного контура насыпи, м; b_0 — высота приточного щелевого отверстия, м

$$\bar{\omega}_{xy} = \sqrt{\bar{\omega}_x^2 + \bar{\omega}_y^2}.$$

В уравнениях (4), (5) значения $\bar{\omega}$ отнесены к скорости истечения ω_0 , м/с, а значения $\bar{H}$, $\bar{b}$ и текущие координаты $\bar{x}$, $\bar{y}$ — к линейному размеру $l/2$, м, для канальной вентиляции и к размеру l для бесканальной вентиляции (см. рис. 1).

Результатами исследований, выполненными рядом авторов [5, 7], установлено, что теплоотдача овощей при охлаждении насыпи зависит от скорости и температуры обтекающего вентиляционного воздуха. При этом оптимальная относительная влажность воздуха и допустимые концентрации в нем углекислого газа устанавливаются автоматически для каждого вида овощей.

Аналитическое решение задачи распределения поля температур воздуха t , °С, и объектов охлаждения (овощей) θ , °С, получено и представлено в статье [2]. Обоснованность принятых допущений была подтверждена результатами решения идентичной задачи численным методом [9].

Для вариантных решений вентиляции в секции овощехранилища (см. рис. 1) получены новые сведения, позволяющие оценить влияние каждого конструктивного и режимного параметра на обеспеченность микроклимата длительного хранения экологически чистой овощной продукции.

Основными линейными параметрами, влияющими на динамику движения воздуха, охлаждающего овощную продукцию, являются размеры расчетного контура насыпи — высота H , м, и глубина движения потока воздуха в горизонтальном направлении $l/2$ или l (см. рис. 1). Высота слоя зависит от плотности объектов. Для клубней картофеля максимальная высота насыпи — 6 м, капусты — 4 м, остальных овощей — до 3 м. Структура пористого слоя принимается полифракционной, среднереализуемой по годам и сортам [5].

В статье рассматривается продукция массового спроса — картофель, для которого объемная пористость слоя составляет 40 %, а средне-реализуемый размер клубней 0,05 м. Для оценки качества формирования микроклимата в насыпи биологически активной овощной продукции принят коэффициент обеспеченности верхнего предела допустимой температуры хранения $K_{об}$. Это доля объема насыпи, в которой темпера-

тура объектов не превышает допустимую для установленного срока качественного хранения. В представленных результатах исследования при длительном сроке хранения (до 10 месяцев) допустимая температура клубней картофеля $\theta_{доп}$ не должна превышать 4 °С.

По литературным данным принято считать, что в верхних слоях насыпи с внутренними тепловыделениями скорость вентиляционного потока не влияет на градиент снижения температуры продукта. На примере вентиляции по схеме рис. 1, а с напольными каналами автором проведены специальные исследования влияния высоты насыпи H на формирование поля температур в применяемом диапазоне значений $H = 3-5$ м. В связи с ограничением скорости истечения потоков из продольных щелей высотой $b_0 = 0,1$ м, расстояние l между каналами обычно принимается в пределах 2,5–3,5 м. Удельный расход подаваемого воздуха в таких процессах охлаждения принимается на тонну продукции v_p , м³/(т·ч).

Установлено, что при $v_p = i \text{ дем}$ более высокие насыпи стабилизируют поле скоростей в ее основании, а за счет увеличения скорости в нижних слоях интенсифицируется процесс охлаждения, повышается коэффициент теплоотдачи. При этом значительно возрастает коэффициент обеспечения нормируемой температуры хранения (рис. 2, а) и увеличивается вместимость секции овощехранилища. Большие возможности также возникают по уменьшению числа напольных распределительных каналов за счет увеличения шага l между ними (рис. 2, б). Для напольных каналов допустимым расстоянием l можно считать 3 м.

Определяющее влияние на формирование микроклимата хранения овощей оказывает основной режимный параметр v_p , характеризующий объемный расход подаваемого воздуха на тонну продукции. Из данных рис. 2, в можно сделать важный вывод, что даже незначительные неточности в назначении расхода вентиляционного воздуха оказывают существенное влияние на обеспечение нормируемой температуры хранения в насыпи. Отсутствие корректной методики расчета не позволяет прогнозировать динамику формирования микроклимата в насыпи с учетом краевых, структурных и теплофизических особенностей системы «вентиляция–насыпь». Как результат — низкая обеспеченность

Рис. 2. Влияние основных расчетных параметров напольной канальной вентиляции на коэффициент обеспечения температурных условий $K_{обс}, \%$, необходимых для качественного хранения клубней картофеля при $\tau = 100^\circ C$: а — влияние высоты насыпи H при $v_p = 70 м³/(т·ч)$; б — влияние расстояния между каналами l при $v_p = 70 м³/(т·ч)$; в — влияние расхода подаваемого воздуха $v_p, м³/(т·ч)$ при $H = 4 м$.

температуры, требуемой для качественного хранения. Например, при хранении насыпью клубней картофеля среднестатистический коэффициент обеспеченности условий качественного хранения изменяется в пределах 70–80 %.

Как уже отмечалось выше, ограничение глубины зоны обслуживания $l/2$ при канальной вентиляции (см. рис. 1, а) и увеличение при этом значения $\bar{H}$ стабилизирует поле скоростей в основании насыпи. Поэтому по истечении времени активного охлаждения продукции τ , которое регламентируется для каждого вида овощей, коэффициент необеспеченности температурных условий хранения K_{p1} устанавливается небольшим, в пределах 0,02–0,03 (2–3 %), рис. 3, а. В верхних слоях насыпи область с превышением допустимой температуры может изменяться в больших пределах, в зависимости от точности выбранных расчетных параметров вентиляции. Новые сведения, представленные выше, позволяют ускорить расчеты по выбору оптимальных параметров и режима работы вентиляции, при которых $K_{p2} \rightarrow 0$ (см. рис. 3, а).

Схема с бесканальным распределением воздуха в пределах контура секции (см. рис. 1, б) имеет неоспоримые технологические и эксплуатационные преимущества перед современной канальной вентиляцией. Однако с увеличением глубины секции l возрастает аэродинамическое сопротивление движению воздуха в горизонтальном направлении, что дестабилизирует поле скоростей, особенно в основании насыпи при $H/l < 1$. Поэтому для каждого вида овощной про-

Рис. 3. Зоны необеспеченности температуры качественного хранения овощной продукции K_{p1} и K_{p2} , характерные для напольной канальной вентиляции (а) и для бесканальной вентиляции (б)

дукции определяется минимальное соотношение параметров H/l , при котором K_{p1} в основании насыпи (см. рис. 3, б) достигает минимального значения при наименьшем экономически обоснованном расходе v_p , $\text{м}^3/(\text{т} \cdot \text{ч})$ и допустимом времени охлаждения τ , ч.

На рис. 4 представлены характерные кривые изменения температуры охлаждаемой продукции в экстремальных зонах насыпи для бесканальной вентиляции: вдоль оси $\bar{x} = x/l$ в основании насыпи (рис. 4, а) и по высоте $\bar{y} = y/l$ на максимальном расстоянии от источника истечения потока (рис. 4, б). Расчетное время работы вентиляции в период охлаждения насыпи принято предельное для длительного хранения клубней картофеля ($\tau = 100$ ч) при экономически обоснованном расходе воздуха $100 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{ч})$.

Рис. 4. Кривые изменения температуры клубней картофеля в экстремальных зонах насыпи, охлаждаемой бесканальной вентиляцией: а — в основании насыпи вдоль оси $\bar{x} = x/l$ на уровне $y = 0,1$ м; б — по высоте насыпи $\bar{y} = y/l$ на максимальном расстоянии от источника потока ($\bar{x} \rightarrow 1$)

Представленные результаты аналитического исследования (см. рис. 4) позволили установить, что при уменьшении относительной высоты насыпи H/l с 1 (6/6) до 0,66 (6/9) K_{p1} в нижней периферийной зоне насыпи изменяется незначительно, точнее $K_{p1} = 0,045-0,078$ при длительном хранении и $K_{p1} = 0,0018-0,02$ при среднесрочном хранении (4–6 месяцев при $\theta_{\text{доп}} = 8^\circ\text{C}$).

Таким образом, бесканальная вентиляция насыпи продукции в секции овощехранилища, устраняя технологические и эксплуатационные недостатки канальной вентиляции, позволяет сохранить объем и качество продукции при различных сроках ее хранения. Применение бесканальной вентиляции с глубокими секциями, когда $H/l \rightarrow 0,5$ и менее, требует дальнейших детальных исследований с применением нетрадиционных методов решения задачи.

Библиографический список

1. Таурит В. Р. Численное и аналитическое решение двухмерной задачи нестационарного теплообмена при вентиляции насыпного слоя // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 5 (34). С. 169–172.
2. Таурит В. Р. Снижение энергоресурсов при охлаждении насыпи экологически чистой овощной продукции // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 161–167.
3. Таурит В. Р. Обеспечение микроклимата хранения в насыпи клубней картофеля // Сельскохозяйственные вести. Международный журнал. 2008. № 3 (74). С. 26–28.
4. Таурит В. Р., Лукина М. А. Обоснование структуры движения вентиляционного потока в контуре насыпного слоя на основе численного решения // Доклады 67-й научной конференции. Ч. I. СПбГАСУ. СПб., 2010. С. 85–88.
5. Бодров В. И. Хранение картофеля и овощей. Горький : Волго-Вятское изд-во, 1985. 223 с.
6. Таурит В. Р. Формирование микроклимата хранения овощной продукции для плоской и объемной задач вентиляции: автореф. дис... д-ра техн. наук. СПб., 2005. 46 с.
7. Волкин И. Л. Промышленная технология хранения картофеля, овощей и плодов. М. : Агропромиздат, 1989. 239 с.

References

1. Taurit V. R. *Chislennoe i analiticheskoe resheniya dvukhmernoy zadachi nestatsionarnogo teploobmena pri*

ventilyatsii nasypnogo sloya [Numerical and analytical solution of two-dimensional problem of unsteady heat exchange at porous layer ventilation]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2012, no. 5 (34), pp. 169–172.

2. Taurit V. R. Snizhenie ehnergoresursov pri okhlazhdenii nasypi ehkologicheski chistoy ovoshchnoy produkcii [Saving the energy resources at cooling the environmentally-friendly vegetable production at mound storage]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 2 (67), pp. 161–167.

3. Taurit V. R. Obespechenie mikroklimata khraneniya v nasypi klubney kartofelya [Providing micro-climate at storage of the mound of potatoes]. *Sel'skokhozyaystvennye vesti. Mezhdunarodnyy zhurnal – Agricultural news. International journal*, 2008, no. 3 (74), pp. 26–28.

4. Taurit V. R., Lukina M. A. Obosnovanie struktury dvizheniya ventilyatsionnogo potoka v konture nasypnogo

sloya na osnove chislennogo resheniya [Substantiation of the ventilation flow structure in the bulk layer contour on the basis of numerical solution]. *Trudy 67-y nauchnoy konferentsii. Ch. I. [Proc. of the 67th sci. conf. Pt. I]*. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2010, pp. 85–88.

5. Bodrov V. I. *Khranenie kartofelya i ovoshchey* [Storage of potatoes and vegetables]. Gorkiy, Volgo-Vyatskoe Publ., 1985, 223 p.

6. Taurit V. R. *Formirovanie mikroklimata khraneniya ovoshchnoy produkcii dlya ploskoy i ob'emnoy zadach ventilyatsii*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Formation of microclimate of vegetable products storage for flat and volumetric ventilation tasks. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2005, 46 p.

7. Volkind I. L. *Promyshlennaya tekhnologiya khraneniya kartofelya, ovoshchey i plodov* [Industrial technology of storage of potatoes, vegetables and fruit]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989, 239 p.