УДК 697.922

© В. Р. Таурит, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: taurit_v_r@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-161-167

© V. R. Taurit, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: taurit_v_r@mail.ru

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ НАСЫПИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ОВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ

SAVING THE ENERGY RESOURCES AT COOLING THE ENVIRONMENTALLY- FRIENDLY VEGETABLE PRODUCTION AT MOUND STORAGE

Разработана методика снижения потребления энергоресурсов в хранилищах за счет использования естественного холода в осенний период в климатических условиях, при которых требуется достоверно прогнозировать темп снижения температуры в насыпи экологически чистой овощной продукции. Рассмотрен вариант хранения каждого вида продукции в отдельных секциях, что позволяет гибко регулировать и доводить температуру смеси наружного и внутреннего воздуха до минимально допустимых значений. На основе апробированного аналитического расчета достоверно прогнозируется процесс формирования поля температур в охлажденной насыпи, дается оценка влияния геометрических и режимных параметров системы «воздух — насыпь» для выбора энергосберегающего их сочетания. Сформулированы требования к графику стояния температуры наружного воздуха в ночное время суток в осенний период года. Их выполнение позволит расширить возможности использования естественного холода в ряде регионов с континентальным и умеренно теплым климатом. Приведен пример расчета и выбора параметров системы охлаждения «воздух — насыпь клубней картофеля», обеспечивающих эффективное использование естественного холода в климатических условиях Санкт-Петербурга.

Ключевые слова: энергоресурсы, хранение, продукция, климат, естественный холод.

There has been developed and presented a scientifically substantiated technique of saving energy resources at mound storage of environmentally friendly vegetable production in autumn period in the climatic conditions which necessitate a reliable forecasting of the temperature fall rate. Variants of each production type storage in separate sections are considered, which allows flexibly regulating and adjusting the temperature of the external and internal air mixture to the minimum admissible values. On the basis of the pilot analytical calculation, the process of temperature field formation in the cooled mound is reliably predicted. The assessment of the geometrical and regime parameters effect of the «air — mound» system for selecting the optimal energy saving combinations is submitted.

Requirements are formulated to the curves of the external air temperature stand at night time during the autumn period. Implementation of these requirements will allow improving the use possibilities of natural cold in a number of regions with continental and temperate warm climate. An example of calculation and selection of the parameters of the «air — potato tubers mound» cooling system providing an effective use of natural cold in climatic conditions of St. Petersburg is given.

Keywords: energy resources, storage, production, climate, natural cold.

Введение

Большим резервом повышения энергоэффективности в различных сферах человеческой деятельности являются производства, использующие в качестве хладоносителя наружный воздух. Таким способом, по определенной технологии можно охлаждать экологически чистые овощи

и другие продукты, сохраняющие питательные вещества, полезные и безопасные для здоровья человека [1–3, 12, 13].

Предмет, объект и задачи исследования

Для оценки возможностей использования естественного холода наружного воздуха в климатических условиях данного региона требуется

согласовывать график стояния суточных температур наружного воздуха (см. www.meteo.nw.ru¹) с конструктивными и режимными параметрами системы «воздух — насыпь», влияющими на качественные показатели процесса охлаждения продукции в объеме насыпи. При этом, в зависимости от задаваемого срока хранения, каждый вид продукции имеет свои оптимальные значения температуры охлаждающего воздуха и свой допустимый перепад температур в насыпном слое [2, 4, 5–8].

В качестве объекта исследования принята секция хранилища (рис. 1, а) с насыпью из клубней картофеля 1 (рис. 1, б), в которую подается охлаждающий воздух через щелевые решетки 2 подпольных распределительных каналов 7. При этом в осенний период холодный наружный воздух в ночное время забирается через смесительный клапан 3, установленный в магистральном вертикальном канале 4. Смесь наружного и внутреннего, нагретого в насыпном слое воздуха, с помощью вентилятора 5 подается в основание насыпи через решетки 2. Излишки внутреннего воздуха из пространства над насыпным слоем удаляются из системы через клапан 6.

¹ ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Раздел «Климат». Климатические обзоры погоды прошедших месяцев и сезонов. URL: <http://www.meteo.nw.ru/> (дата обращения: 26.10.2017).

Решение задачи охлаждения исследуемого объекта с использованием естественного холода состоит в том, чтобы:

- на входе в насыпь поддерживать стабильную предельно допустимую температуру воздуха;
- расчетным путем выявить рациональные сочетания комплекса параметров системы «воздух — насыпь», при которых температура насыпи будет снижаться с определенным темпом, пока не достигнет значений, требуемых для качественного хранения всего объема продукции;
- установить климатические данные стояния температур воздуха в ночное время суток, позволяющие эффективно их использовать при оптимальных расчетных параметрах системы охлаждения насыпи продукции.

Методика воспроизведения процесса охлаждения на модели

Описание поля температур при нестационарном двухмерном процессе теплообмена в насыпном слое с источниками биологической теплоты получено на основе теплофизической модели, в результате решения нелинейных уравнений в частных производных, основанных на применении закона сохранения энергии [9]. Распределение температуры продукции в насыпном слое в безразмерном виде описывается уравнениями

Рис. 1. Схема использования естественного холода при охлаждении насыпного слоя продукции в секции хранилища: а — секция с воздухом распределительными каналами; б — устройство для обеспечения нормируемой температуры подаваемого воздуха

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}' + \bar{q}_v \left[\int_0^{\xi} e^{\lambda - \xi} \left(\int_0^{\eta} e^{-s} I_0 \left(2\sqrt{s(\xi - \lambda)} \right) ds \right) d\lambda + \right. \\ \left. + e^{-\eta} \int_0^{\xi} e^{\lambda - \xi} I_0 \left(2\sqrt{\eta(\xi - \lambda)} \right) d\lambda \right], \quad (1)$$

$$\bar{\theta} = \Gamma_1(\eta, \xi) = 1 - (\xi, \eta) = e^{-\eta} \int_0^{\xi} e^{-s} I_0 \left(2\sqrt{\eta s} \right) ds. \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2): $\bar{\theta} = (\theta - t_0) / (\theta_0 - t_0)$; $\bar{q}_v = q_v / \alpha_v (\theta_0 - t_0)$, где θ_0 , t_0 — начальная температура насыпи перед охлаждением и температура воздуха на входе в слой, °С; q_v — удельная величина теплоты дыхания, Вт/м³; α_v — коэффициент теплопередачи с единицы объема насыпи, Вт/(м³ · °С).

Уравнения, описывающие безразмерные значения $\eta(\bar{\omega})$ и $\xi(\bar{\omega}, \bar{\tau})$ для двухмерного потока воздуха в насыпном слое, представлены в работе [6], в которых $\bar{\tau} = \tau \omega_0 / L$; $\bar{\omega} = \omega / \omega_0$, где τ — требуемое время активного охлаждения насыпи, ч; L — расстояние между распределительными каналами, м; ω, ω_0 — скорость воздуха в поровом пространстве слоя и в отверстии b_0 (см. рис. 1) на входе в насыпь соответственно, м/с.

Описание поля скоростей в двухмерном потоке воздуха в насыпном слое получено из рассмотрения потенциального движения и линейной зависимости давления от скорости [11]. Это позволило использовать обычные аналитические методы решения задачи.

Установлено, что при идентичном удельном расходе воздуха v_p , м³/(т · ч), скорость воздуха в локальной области с координатами $\bar{x} = x / 0,5L$, $\bar{y} = y / 0,5L$ зависит от высоты насыпи H , м, и геометрии ее расчетного контура, характеризуемого значением $\bar{H} = H / 0,5L$. Решение задачи получено при расположении приточного отверстия b_0 горизонтально в подпольном канале 7 (см. рис. 1) и вертикально в напольном канале.

Корректность аналитического описания полей температуры и скорости в процессе охлаждения насыпи наружным воздухом доказана также численными методами и результатами натурных исследований [14].

Результаты исследования

Для эффективного использования холода наружного воздуха в первую очередь необходимо определиться с температурным режимом воздуха, подаваемого в насыпь (t_0 , °С), и допустимым

сроком работы системы воздушного охлаждения насыпи (N , сут), расположенной в секции хранилища.

С целью снижения потерь влаги и сохранения питательных веществ температура воздуха t_0 , °С, должна быть предельно низкой для данного вида продукции, а темп ее охлаждения Z , град/ч, не должен вызывать физиологических расстройств [10]. Основным режимным параметром, активно влияющим на временные показатели (Z, N) и выбор геометрии расчетного контура ($\bar{H}$), является удельный расход воздуха на тонну продукции v_p , м³/(т · ч).

Специалистами для каждого вида биологической продукции рекомендуется свой предел изменения значений Z и N . Возможный диапазон высоты H составляет 3–6 м в зависимости от плотности составляющих слоя. Удельный расход воздуха v_p может изменяться в значительных пределах — от 50 и более м³/(т · ч). Верхний предел значений v_p , как и расстояния L между каналами, ограничивается конструктивным решением системы распределения воздуха, которое должно исключить повышенную усушку продукции за счет снижения скорости на входе в насыпь до $\omega_0 < 1$ м/с.

Ниже приводится пример использования естественного холода наружного воздуха в режиме охлаждения насыпи клубней картофеля до рекомендуемой температуры при длительном хранении. Хранилище секционного типа расположено в климатическом районе Санкт-Петербурга.

Выбираем систему с воздушным охлаждением насыпи через решетки подпольных каналов (см. рис. 1), имеющую незначительную скорость истечения воздушного потока в слой продукции.

Известны исходные параметры для расчета: начальные температуры насыпи θ , °С, и охлаждающего приточного воздуха t_0 , °С; нормируемый диапазон температуры в слое при длительном хранении $\theta = 2...4$ °С; продолжительность периода охлаждения $N = 20...40$ сут; $q_v = 12$ Вт/м³; темп охлаждения для клубней картофеля $Z = 0,01...0,06$ град/ч.

При движении охлаждающего воздуха через насыпь температура ее составляющих изменяется по времени и объему от нижних нормируемых значений ($\theta \rightarrow 2$ °С) до предельно допустимых при

хранении ($\theta \rightarrow 4^\circ\text{C}$). Процесс охлаждения составляющих насыпи замедляется с увеличением расстояния от приточного отверстия b_0 (рис. 2, а). Качество охлаждения экологически чистой продукции двумерными потоками обосновывается коэффициентом $K_{об}$ обеспеченности нормируемой температуры ее хранения θ :

$$K_{об} = 1 - K_p, \quad (3)$$

где K_p — суммарный коэффициент необеспеченности температуры хранения θ в нижней зоне насыпи K_{p1} и в верхней K_{p2} (см. рис. 2, а).

Нижняя зона K_{p1} всегда сохраняется в процессе охлаждения, но имеет небольшие значения коэффициента в пределах 0,02...0,04. Верхняя зона K_{p2} развивается динамично. Поэтому требуемое максимальное время работы системы охлаждения τ должно определиться из условий: $K_{p2} \rightarrow 0$, $K_{об} = 1 - K_{p1}$.

С целью экономии энергетических ресурсов в период эксплуатации системы подачи холодного воздуха нужно стремиться к снижению удельного расхода v_p , м/(т · ч). С помощью методики расчета, изложенной в статье, можно выявить влияние каждого расчетного параметра или их сочетания на поле температур продукции θ , охлаждаемой холодным наружным воздухом.

На примере (рис. 2, б) показано положительное влияние увеличения высоты насыпи на поле θ , а следовательно, и на величину коэффициента

$K_{об}$. Установлено также, что для каждого вариантного решения в проекте следует определять свои режимные и геометрические значения расчетных параметров (см. таблицу), обеспечивающих эффективное использование естественного холода для сохранности скоропортящейся овощной продукции, положительно влияющей на здоровье человека.

Дальнейшее прогнозирование конечных результатов по эффективному использованию естественного холода невозможно без климатических графиков (рис. 3, а) стояния наружной температуры воздуха в ночное время суток². При этом исходными данными для определения начала, продолжительности N , сут, и периодичности работы системы воздушного охлаждения $\tau_p^{\max}$ ч/сут, являются:

- стабильность стояния в осенний период наружной температуры, равной t_0 , °C;
- расчетное значение суммарного времени, требуемого для снижения температуры с начальной θ_0 до θ_k в зоне, когда $K_{p2} \rightarrow 0$.

Для выбранной системы распределения охлаждающего воздуха через подпольные каналы наиболее экономичным является вариант с высокой H насыпи, когда $H = 5$ м, $L = 2$ м,

² ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Раздел «Климат». Климатические обзоры погоды прошедших месяцев и сезонов. URL: <http://www.meteo.nw.ru/> (дата обращения: 26.10.2017).

Рис. 2. Динамика охлаждения экологически чистой продукции естественным холодом: а — схема расположения областей K_{p1} и K_{p2} в расчетном контуре насыпи; б — коэффициенты обеспеченности температуры картофеля при $v_p = 50$ м³/(т · ч), $\tau = 90$ ч, $b_0 = 0,6$ м

Рис. 3. График стояния температур в климатическом районе Санкт-Петербурга: а — показательный график климатических параметров в октябре 2014 года (источник: <http://www.meteo.nw.ru/>, раздел «Климат»); б — расчетный график стояния температур в ночное время суток за осенний период 2014 года (1...2 — период охлаждения естественным холодом)

$v_p = 50 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{ч})$ (см. таблицу). При этих данных расчетное значение требуемого времени работы системы τ_p^{max} , определенного по вышеизложенной методике, составляет 95 ч. Общая продолжительность периода охлаждения насыпи определяется из уравнения

$$N = \frac{\theta_0 - \theta_k}{24Z}. \quad (4)$$

Темп охлаждения клубней Z , град/ч, принимается минимально допустимым с целью снижения темпа изменения температуры θ в области истечения воздуха в насыпь:

$$N = \frac{12 - 4}{24 \cdot 0,01} = 34 \text{ сут.} \quad (5)$$

Периодичность работы системы подачи воздуха для охлаждения

$$\tau_v = \frac{\tau_p^{\text{max}}}{N} = \frac{95}{34} = 2,8 \text{ ч/сут.} \quad (6)$$

Для оценки возможностей использования холодного воздуха в ночные часы, при рассмотре-

нии климатических графиков следует исходить из следующих рекомендаций:

- дата включения системы подачи наружного воздуха должна приниматься, когда его температура будет близкой или соответствовать минимально допустимому значению t_0 ;
- следует учитывать, что дате начала охлаждения насыпи продукции должен предшествовать лечебный период (15–20 сут);
- число отключений, когда температура наружного воздуха превышает значение t_0 , должно быть минимальным по величине и по продолжительности их стояния;
- при низких значениях температуры наружного воздуха для их доведения до минимально допустимой величины t_0 следует использовать смесительный клапан (см. рис. 1, б), обеспечивающий частичную рециркуляцию внутреннего теплого воздуха;

Динамика процесса охлаждения насыпи

$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$\nu_p, \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{ч})$	$\tau_p^{\text{max}}, \text{ ч}$	$\theta_k, ^\circ\text{C}$	$N, \text{ сут}$	$Z, \text{ град/ч}$	$\tau_b, \text{ ч/сут}$
1,5	3,0	50	105	4,0	34	0,01	3,1
2,0	3,0	60	95	4,0	34	0,01	2,8
3,0	3,0	70	85	4,0	34	0,01	2,5
3,0	3,0	90	62	4,0	34	0,01	2,1
2,0	3,0	50	95	4,0	34	0,01	2,8
3,0	3,0	60	105	4,0	34	0,01	3,1

• временной режим работы системы охлаждения насыпи следует определить расчетным путем по продолжительности периода N , сут (4) и периодичности включения системы подачи наружного воздуха τ_b , ч/сут (6).

Из представленного примера использования полученного результата научно-методических исследований следует, что климатические условия осеннего периода Санкт-Петербургского региона (рис. 3, б) позволяют широко и без риска использовать естественный холод для длительного хранения такой востребованной продукции, как картофель.

Большое практическое значение для экономики энергетических ресурсов в хранилищах имеет перспектива использования разработанной методики в регионах с климатическими условиями, требующими достоверного прогнозирования эффективности использования холода наружного воздуха в осенний период.

Вывод

Предложенная методика и полученные результаты обосновывают снижение расхода энергетических ресурсов за счет применения естественного холода в осенний период, особенно в регионах с наружным климатом, требующим достоверного прогнозирования результатов охлаждения экологически чистой овощной продукции в секциях хранилищ.

Библиографический список

1. Бодров В. И., Махов Л. М., Троицкая Е. В. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха производственных зданий сельскохозяйственного назначения. Н. Новгород: ННГАСУ, 2014. 237 с.
2. Бодров В. И., Бодров М. В., Ионичев Е. Г., Кучеренко М. И. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений. Н. Новгород: ННГАСУ, 2008. 623 с.
3. Жадан В. З., Рослов Н. Н., Мартынов Я. В., Кулаков С. И. Критерии климатического районирования страны в целях использования естественного холода в картофеле- и овощехранилищах // Холодильная техника. 1986. № 6. С. 10–13.
4. Гинзбург А. С., Громов М. А. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. М.: Агропромиздат, 1987. 272 с.
5. Абрамов Г. М. Основы проектирования и функционирования оборудования картофеле- и овощехранилища. Сб. докладов III съезда АВОК. М., 1993. С. 130–132.
6. Таурич 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.
8. Рослов Н. Н. Комплексы для хранения картофеля и овощей. М.: Россельхоз, 1985. 206 с.
9. Таурич В. Р. Численное и аналитическое решение двумерной задачи нестационарного теплообмена при вентиляции насыпного слоя // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 5 (34). С. 169–172.
10. Бодров В. И. Хранение картофеля и овощей. Горький: Волго-Вятское изд-во, 1985. 496 с.
11. Таурич В. Р., Луканина М. А. Расчет поля скоростей в плотных насыпных слоях при решении инженерных задач // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 2 (27). С. 139–142.
12. Широков Е. П. Технология хранения и переработки плодов и овощей. М.: Колос, 1978. 310 с.
13. Трошин В. Г. Обеспечение микроклиматических условий хранения картофеля системами активной вентиляции: дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1983. 173 с.
14. Таурич В. Р., Луканина М. А. Численное исследование математической модели охлаждения двухмерными потоками насыпного слоя с источни-

ками теплоты // Доклады 68-й науч. конф. Ч. 2. СПб.: СП6ГАСУ, 2011. С. 148–151.

References

1. Bodrov V. I., Makhov L. M., Troitskaya E. V. *Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukhа proizvodstvennykh zdaniy sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Heating, ventilation and air conditioning of production building of agricultural purpose]. N. Novgorod, 2014, NNGASU Publ., 237 p.
2. Bodrov V. I., Bodrov M. V., Ionichev E. G., Kucherenko M. I. *Mikroklimat proizvodstvennykh sel'skokhozyaystvennykh zdaniy i sooruzheniy* [Microclimate of production agricultural buildings and structures]. N. Novgorod, NNGASU Publ., 2008, 623 p.
3. Zhadan V. Z., Roslov N. N., Martynov Ya. V., Kulakov S. I. *Kriterii klimaticheskogo rayonirovaniya strany v tselyakh ispol'zovaniya estestvennogo kholoda v kartofele- i ovoshchekhranilishchakh* [Criteria of climatic division into districts of the country for use of natural cold in potato- and vegetable storehouses]. *Kholodil'naya Tekhnika – Refrigeration Engineering*, 1986, no. 6, pp. 10–13.
4. Ginzburg A. S., Gromov M. A. *Teplofizicheskie kharakteristiki kartofelya, ovoshchey i plodov* [Thermal and physical characteristics of potatoes, vegetables and fruit]. Moscow, Agroprom Publ., 1987, 272 p.
5. Abramov G. M. *Osnovy proektirovaniya i funktsionirovaniya oborudovaniya kartofele- i ovoshchekhranilishcha* [Basics of design and functioning of potatoes- and vegetable storehouse equipment]. *Trudy III s'ezda AVOK* [Proc. of the III Congress of AVOK]. Moscow, 1993, pp. 130–132.
6. Taurit V. R. *Formirovanie mikroklimata khraneniya ovoshchnoy produktsii dlya ploskoy i ob'emnoy zadach ventilyatsii. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Forming a microclimate of vegetable production storage for solving the surface area and volume problems of ventilation. 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.
8. Roslov N. N. *Kompleksy dlya khraneniya kartofelya i ovoshchey* [Building complexes for storage of potatoes and vegetables]. Moscow, Rossel'khoz, 1985, 206 p.
9. Taurit V. R. *Chislennoe i analiticheskoe reshenie 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.
10. Bodrov V. I. *Khranenie kartofelya i ovoshchey* [Storage of potatoes and vegetables]. Gor'kiy, Volgo-Vyatskoe Publ., 1985, 496 p.
11. Taurit V. R., Lukanina M. A. *Raschet polya skorostey v plotnykh nasypnykh sloyakh pri reshenii inzhenernykh zadach* [Calculation of velocity field in compact porous layers at engineering tasks solution]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2011, no. 2(27), pp. 139–142.
12. Shirokov E. P. *Tekhnologiya khraneniya i pererabotki plodov i ovoshchey* [Technology of storage and processing of fruit and vegetables]. Moscow, Kolos Publ., 1978, 310 p.
13. Troshin V. G. *Obespechenie mikroklimaticheskikh usloviy khraneniya kartofelya sistemami aktivnoy ventilyatsii. Diss. kand. tekhn. nauk* [Provision of microclimatic potato storage conditions with the active ventilation systems. PhD in Sci. Tech. diss.]. Gor'kiy, 1983, 173 p.
14. Taurit V. R., Lukanina M. A. *Chislennoe issledovanie matematicheskoy modeli okhlazhdeniya dvukhmernymi potokami nasypnogo sloya s istochnikami teploty* [Numerical research of mathematical model of two-dimensional flow cooling of porous layer with heat sources]. *Trudy 68-y nauch. konf. Ch. 2* [Proc. of the 68-th scientific conf. Pt. 2]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2011, pp. 148–151 (in Russian).