

УДК 631.12:504.06

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УСЛОВИЙ ХРАНЕНИЯ ПРОДУКЦИИ

И.В. Яковлев, аспирант кафедры ТСБ

Научный руководитель: А.К. Горелкина, д.т.н., профессор

Кемеровский государственный университет

г. Кемерово

Функционирование современных логических систем во многом зависит от эффективного управления условиями хранения продуктов. Условия, не соответствующие нормативам, такие как недостаточная влажность, колебания температуры и неудовлетворительная вентиляция, могут привести к значительным потерям и ухудшению качества хранящейся продукции. В связи с этим оптимизация параметров хранения на основе математических моделей в значительной степени позволит увеличить сохранность продукции, а их разработка с учетом вариативности различных параметров становится актуальной задачей в области логистики и управления цепочками поставок.

В настоящее время оптимизация параметров хранения востребована как пищевой промышленностью, так и органами здравоохранения на национальном и международном уровне. Хорошо известно, что большинство продуктов питания является скоропортящимися, поскольку подвергаются изменения в их структуре, состав и свойства при хранении до потребления. Эти изменения имеют физико-химическое происхождение и связаны с химическим составом пищи [1, 2].

Процесс хранения продуктов требует строго контроля множества факторов, включая, но не ограничиваясь, температурой, влажностью, уровнем углекислого газа и скоростью вентиляции. Эти элементы оказывают непосредственное влияние на сроки годности и качество продуктов. Даже небольшие отклонения в температурном режиме могут привести к утрате вкусовых и питательных качеств продуктов.

Для моделирования полной модели представим ее в виде графа. Граф представляет собой взаимосвязь между вершинами (узлами) и ребрами (связями).

Вершина графа – точка в графе, отдельный объект (параметр), для топологической модели графа не имеет значения координаты, может сохранять числовые значения.

Ребро графа – произвольная пара двух вершин, которые связаны между собой. Ребрам возможно присвоение «веса», что позволяет говорить о «загруженности графа» и с помощью этого решать задачи оптимизации [3, 4].

Рассмотрим предложенный граф  $G$  (рис.1), заданный множеством точек или вершин  $X$  и с множеством линий или ребер  $E$ . Таким образом, граф  $G$  полностью задается (обозначается) парой  $(X, E)$ .

Сбор данных о различных видах продукции  $X_1$  и их физиологических характеристиках, таких как оптимальные условия хранения (температура и влажность), а также мониторинг текущих параметров  $X_T$  – температура,  $X_\phi$  – влажность,  $X_B$  – вентиляция и  $X_C$  – световой режим с помощью сенсоров и устройств. Анализ информации о потерях продукции –  $X_1$ , при разных условиях хранения.

Определение основных параметров, влияющих на качество продукции –  $X_2$ , включая:  $X_T$  – уровень гниения,  $X_m$  – потерю массы и  $X_{и.с}$  – изменения, а органолептических свойствах. Установление допустимых значений для каждого из этих параметров –  $X_n$ .

Разработка математической модели (1), основывается на ключевых параметрах, которые обеспечивают эффективное хранение –  $X_M$ .

Применения методов оптимизации –  $X_{оп}$ , использование линейного и нелинейного программирования, подходов машинного обучения для прогнозирования потерь при различных условиях. Получение оптимизированной модели прогнозирования –  $X_M^{оп}$ .

Создание системы мониторинга и управления –  $X_{МН}$ , которая будет опираться на математическую модель и обеспечивать постоянный контроль за условиями хранения.

Анализ результатов –  $X_a$ , на основе предоставленных данных позволит корректировать модель и обучать систему на новые данные, что повысит точность прогнозирования потерь. Загруженность графа примем как –  $a_i$ .

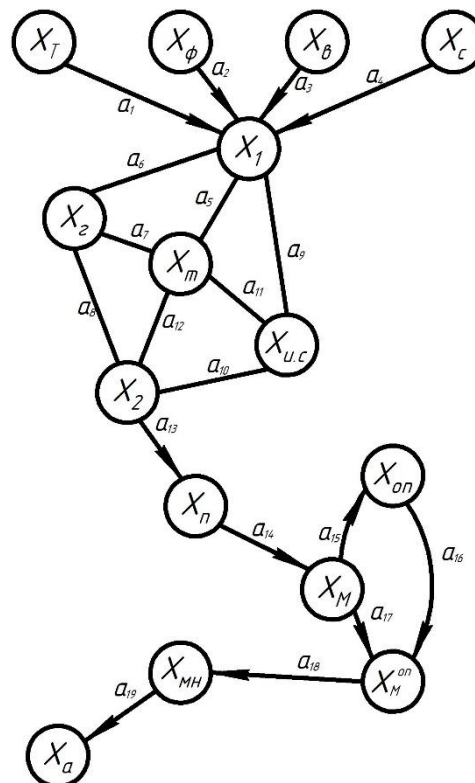


Рисунок 1 – Модель графа для оптимизации условий хранения продукции

На основе предложенного графа (рис. 1) составим математическую модель потери продукции, которые хранятся в закрытом помещении описывая уравнением:

$$\frac{dN}{dt} = V_p - P(t) \cdot N \cdot e^{-\alpha T + \beta H} \quad (1)$$

где  $V_p$  — скорость прорастания овощей,  $\frac{\text{см}}{\text{день}}$ ;

$N$  — количество овощей, шт.;

$P(t)$  — величина, характеризующая потерю;

$T$  — температура, К;

$H$  — влажность;

$\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, отражающие зависимость потерь от температуры и влажности;

$e$  — основание натурального логарифма ( $e \approx 2.718$ ).

Предположим, что величина, характеризующая потерю  $P(t)$ , основывается на скорости гниения может быть описано следующей формулой:

$$O(t) = P_0 \cdot e^{-kt} \quad (2)$$

$$P(t) = P_0 - O(t) \quad (3)$$

где  $P(t)$  — величина, характеризующая потерю;

$O(t)$  — количество овощей в момент времени  $t$ ;

$P_0$  — начальное количество овощей;

$k$  — коэффициент скорости гниения (зависящий от температуры и влажности);

$e$  — основание натурального логарифма ( $e \approx 2.718$ );

$t$  — время, (часах, днях).

Предположим, что скорость прорастания овощей  $V_p$  может быть описана как функцию времени:

$$V_p = a \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right)} \cdot H \quad (4)$$

где  $V_p$  — скорость прорастания картошки,  $\frac{\text{см}}{\text{день}}$ ;

$a$  — константа, зависящая от сорта картошки и других факторов;

$E_a$  — энергия активации прорастания,  $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ ;

$R$  — универсальная газовая постоянная, ( $R \approx 8.314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ );

$T$  — температура в Кельвинах, которая рассчитывается по формуле ( $T = t + 273.15$ );

$H$  — относительная влажность в десятой доле (например, 0.9 для 90%).

Разработка и внедрение математических моделей для оптимизации условий хранения продукции в том числе сельскохозяйственной является ключевым аспектом в процессе управления цепочками поставок. Это не только позволяет минимизировать потери и улучшить качество продукции, но и значительно снижает затраты.

Данная предложенная математическая модель подлежит практическому подтверждению. Исследования в этой области продолжаются, и их результаты будут способствовать созданию более эффективной и устойчивой математической модели системы.

### Список литературы:

1. A. R. Kader, "Postharvest Technology of Horticultural Crops," University of California, 2003. URL: <https://journals.ju.edu.et/index.php/ejast/article/view/537>.
2. J. M. C. Santos, et al., "Mathematical Modeling of the Shelf Life of Fresh Vegetables," Journal of Food Science, vol. 79, no. 1, pp. 147-156, 2014. URL: [https://cdn.intechopen.com/pdfs/35124/InTech-Principles\\_and\\_methodologies\\_for\\_the\\_determination\\_of\\_shelf\\_life\\_in\\_foods.pdf](https://cdn.intechopen.com/pdfs/35124/InTech-Principles_and_methodologies_for_the_determination_of_shelf_life_in_foods.pdf).
3. Оре О. Графы и их применение. – Рипол Классик, 1965. URL: [https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=HJj7AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%8B&ots=IZeJbPpfja&sig=Ps5dzt0igLBkEIXs5kwIsqpKZ3E&redir\\_esc=y#v=onepage&q=%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%8B&f=false](https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=HJj7AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%8B&ots=IZeJbPpfja&sig=Ps5dzt0igLBkEIXs5kwIsqpKZ3E&redir_esc=y#v=onepage&q=%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%8B&f=false)
4. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход [Текст] / Кристофидес Н. Москва: "Мир", 1978 — 432 с.
5. Быкова В. В. О мерах целостности графов: обзор // Прикладная дискретная математика. – 2014. – №. 4 (26). – С. 96-111. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-merah-tselostnosti-grafov-obzor/viewer>