

АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ РЕГУЛИРУЕМОГО ХРАНЕНИЯ КОРНЕПЛОДОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

Д.В. Арапов

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В работе представлено решение проблемы разработки математических моделей для АСУ регулируемого хранения корнеплодов сахарной свеклы на базе опубликованных в открытой печати опытных данных. Реализовано ранжирование повреждений корнеплодов сахарной свеклы. Проведена классификация условий их хранения. Выполнено ранжирование сортности и массы корнеплодов. С учетом проведенной систематизации разработаны нейросетевые и нелинейные математические модели основных показателей хранения корнеплодов сахарной свеклы. Погрешности полученных нелинейных моделей не превышают погрешности получения экспериментальных данных и составляют не более 5-7% относительных.

Ключевые слова: математическая модель, показатель хранения, корнеплод сахарной свеклы, нейронная сеть.

ANALYSIS AND PROCESSING OF REGULATED DATA STORAGE OF SUGAR BEET ROOT CROPS

D.V. Arapov

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. The paper presents a solution to the problem of developing mathematical models for automated control systems for regulated storage of sugar beet root crops based on experimental data published in the open press. The ranking of damage to sugar beet root crops has been implemented. The classification of their storage conditions has been carried out. The ranking of the variety and weight of root crops has been performed. Taking into account the carried out systematization, neural network and nonlinear mathematical models of the main indicators of storage of sugar beet root crops have been developed. The errors of the obtained nonlinear models do not exceed the errors of obtaining experimental data and are no more than 5-7% relative.relative.

Key words: mathematical model, storage index, sugar beet root crop, neural network.

Различают краткосрочное (до 10-15 суток), среднесрочное (до 30 суток) и длительное (более 30 суток) виды хранения сахарных корнеплодов. При среднесрочном и длительном хранении к потерям сахарозы на дыхание [1] добавляются еще потери на прорастание, потери на связанные с ферментами биохимические процессы и гниение корнеплодов. В ходе биохимических процессов, обусловленных углеводным обменом сахарозы за счет активности фермента

инвертазы, в корнеплодах накапливаются трудноотделяемые и вредные моно- и полисахариды. Скорость биохимических процессов оценивается по активности инвертазы и концентрации редуцирующих веществ в хранимых корнеплодах [2]. Скорость микробиологических процессов может быть оценена по накоплению гнилой массы в кагатах хранения свеклы [3]. Главная роль в потерях сахарозы принадлежит дыханию корнеплодов [4]. Для снижения потерь сахарозы при хранении свеклосырья предлагается перейти от неуправляемого хранения в полевых кагатах к поддающемуся контролю управляемому хранению на заводских свеклопунктах [4-7]. В [8] экспериментально определили оптимальный регулируемый режим полугодового хранения корнеплодов сахарной свеклы в специализированном хранилище: температура +2 °С, относительная влажность воздуха 95%.

Очевидные недостатки опытного исследования [6,7] – отсутствие экспериментов по влиянию антибактериальной обработки и степени укрытия кагатов на потери сахарозы, а также практически полное отсутствие математической обработки обширных опытных данных, которая может быть эффективно реализована с использованием методов искусственного интеллекта и нелинейного программирования.

Несмотря на высокую эффективность и рентабельность технологий управляемого хранения свеклосырья отмечается [5] низкий темп их внедрения сахарными заводами. Одной из причин этого может быть практически полное отсутствие адекватного математического описания этих технологий хранения. В этой связи, создание адекватных математических моделей (ММ) для контроля и управления качественными показателями процесса хранения свеклосырья ускорит темп внедрения новых технологий управляемого хранения, что является целью работы.

Опытные исследования, проводимые с корнеплодами сахарной свеклы, очень специфичны, трудоемки и длительны по времени [9]. Интенсивность дыхания поврежденных корнеплодов, так же, как и подвяленных резко возрастает [10]. При исследовании влияния на дыхание свеклы площади порезов для опытов авторы [6] использовали корнеплоды с массой от 400 до 800 грамм, выкопанные вручную. По методике [11] определяли интенсивность дыхания цельных и поврежденных корнеплодов с использованием респирационного аппарата Толмачева. Остальные параметры определяли согласно ГОСТ [9]. Данные этих опытов приведены авторами [6] в % относительно стабилизированной величины интенсивности дыхания. К сожалению, авторы не приводят параметры стабилизированного состояния. В этой связи за эту величину (за 100 %) оценочно приняли интенсивность дыхания цельных корнеплодов, убранных свеклокомбайном и равную по данным [6] 7,78 мг СО₂/(ч кг), которой соответствуют среднесуточные потери сахара 0,0121 % к массе свеклы. Тогда пересчет интенсивности дыхания Y_m из % в мгСО₂/(ч·кг) можно реализовать по формуле:

$$Y_m = Y_m \% \cdot 7,78 / 100\%, \quad (1),$$

а среднесуточные потери сахарозы можно рассчитать умножением (1) на 0,0121.

Проведенное в ходе вычислительных экспериментов, ранжирование повреждений, наносимых комбайном и получаемых при транспортировке и перевалке при механизированной уборке для 10-ти суточного хранения позволило осуществить их систематизацию следующим образом: корнеплод практически цельный – 1 балл; с отломанной хвостовой частью – 0,9 балла; с отбитым боком вплоть до повреждения головки – 0,74 балла; с отбитой головкой корня – 0,73 балла; продольный разрез корнеплода – 0,6 балла; ударенный 8 раз – 0,55 балла; разбитый вдоль корнеплод – 0,4 балла; усредненные повреждения корнеплодов в ворохе из под комбайна – 0,7 балла; ударенный более 8 раз и сильно побитый и ободраный – 0,3 балла; раздавленный с сохранением формы – 0,2 балла; обломки и хвосты корнеплода – 0,1 балла.

Классификация способов хранения корнеплодов сахарной свеклы следующая: одиночный корнеплод, лежащий в поле – 0,1 балла; неукрытые корнеплоды, лежащие в отдельных валках или кучах – 0,2 балла; корнеплоды собранные в неукрытых кагатах – 0,3 балла; кагаты покрытые свекольной ботвой толщиной 20 см – 0,6 баллов; кагаты покрытые соломенными матами – 0,8 балла; кагаты покрытые землей с толщиной покрытия 25 см – 1 балл; кагат укрытый 3-хслойной п/э пленкой по ТУ 2245-001-11084589-96 – 1 балл; кагат укрытый 3-хслойной п/э пленкой со светоотражающей поверхностью с коэффициентом отражения более 70% и модифицированной солью $C_8H_7O_4Na$ – 1,5 балла; та же пленка, но с модификацией солью C_6H_5COONa – 1,7 балла; та же пленка, но с модификацией антисептиком $C_{10}H_7N_{3S}$ – 2,0 балла. Температура модификации п/э пленки – не менее 300 °С. Специализированное нерегулируемое корнехранилище подвального типа ($t = \pm 1 - \pm 6$ гр. С, влажность 91 – 95 %) – 2 балла; то же хранилище, но с регулируемым режимом ($t = +2$ °С, влажность 95%) – 4 балла; кагат с принудительной вентиляцией – 2 балла; кагат вентилируемый с противомикробным укрытием – 4 балла.

Авторы [10] получили данные по потерям массы свеклы и сахарозы при увядании корнеплодов при их кратковременном хранении. Ранжирование корнеплодов по среднегрупповой массе реализовано нами путем разбития их на 4 группы: 0,225, 0,675, 1,125 и 1,405 кг. Ранг подвяленных корнеплодов приняли равным 1, а неувядших – 0.

Ранжирование сортности выполнено по сахаристости гибридов.

Нейросетевое моделирование выполнили с использованием стандартного модуля TensorFlow и языка Python версии 3.11.7. Использовали библиотеки – Numpy и Matplot. При нелинейном моделировании использовали передовые методы ИТ – технологий с применением нелинейного программирования [13,14]. Минимизировали суммарный квадратичный критерий R относительной ошибки моделирования.

Экспериментальные данные зависимости потерь массы свеклосырья при 15-ти суточном хранении от массы корнеплода взяты из [10].

Моделирование посуточного изменения интенсивности дыхания корнеплодов в зависимости от ранга повреждений при 10-ти суточном хранении (80 опытов) по данным украинских ученых [6,7] реализовано посредством нейронной сети. Сеть для моделирования представляет собой многослойный персеп-

трон, состоящий из входного слоя в 12 нейронов, четырех скрытых слоев также по 12 нейронов и одного выходного слоя, имеющего 1 нейрон. Входной слой имеет два входа, на который подаются сигналы о времени хранения в сутках и ранге повреждения в долях единицы. С выхода персептрона снимается сигнал об интенсивности дыхания в мг $\text{CO}_2/\text{ч}\cdot\text{кг}$. Всего исследовано 8 состояний повреждений корнеплодов. Средняя относительная погрешность нейросети составила $\pm 5,94\%$.

Структура нейронной сети для моделирования зависимости интенсивности дыхания корнеплодов от площадей: неповрежденных, нанесенных повреждений и суммарной площади поверхности корнеплодов (40 опытов) аналогична предыдущей. Многослойный персептрон, состоит из входного слоя в 12 нейронов, четырех скрытых слоев также по 12 нейронов и одного выходного слоя, имеющего 1 нейрон. Но входной слой имеет уже 4 входа, на которые подаются сигналы о площадях неповрежденной, поврежденной и суммарной поверхностей корнеплодов, а также признак увядания корнеплодов: 1 – подвяленный, 0 – относительно свежий. С выходного слоя снимается сигнал интенсивности дыхания в $\text{см}^3 \text{CO}_2/\text{кг}\cdot\text{ч}$. Средняя ошибка моделирования нейросети составила $\pm 4,17\%$ отн.

Нелинейная модель интенсивности дыхания от площади неповрежденной поверхности и поверхности повреждения выглядит следующим образом:

$$Y_m = 100 \cdot a_1 / RX + a_2 / RX^2 + 10 \cdot a_3 / X_3^{0,5} + 10 \cdot a_4 \cdot X_2 / RX + 100 \cdot a_5 \cdot X_2 + 1000 \cdot a_6 \cdot X_2^2 + 1E - 13 \cdot a_7 \cdot \exp(100 \cdot a_{11} \cdot X_2) + 100 \cdot a_8 / X_1 + a_9 / X_1^2 + 100 \cdot a_{10} \cdot X_2 / X_1 + 100 \cdot a_{12} \cdot X_2 / X_3 + a_{13} X_4 X_3, \quad (2)$$

где X_1 – площадь поверхности неповрежденного корнеплода, $0,001 \cdot \text{см}^2$; X_2 – площадь поверхности раны, $0,001 \cdot \text{см}^2$; $X_3 = X_1 + X_2$, $0,001 \cdot \text{см}^2$; $RX = (X_1 - X_2)$, $0,001 \cdot \text{см}^2$; X_4 – признак увядания корнеплода, 0 или 1.

$R=0,16552$ при шаге $0,1E-6$. Средняя ошибка моделирования составила $\pm 6,43\%$ отн. Число опытов 40.

При отдельном моделировании по данным [6] зависимости интенсивности дыхания (в %) от времени краткосрочного хранения (1 – 10 суток) получили:

1) Корнеплоды без значительных механических повреждений:

$$Y_m \% = a_1 \cdot 1000 / X^{a_2} \cdot \exp(a_3 \cdot X^{a_4 \cdot 1E-4}) + a_5 \cdot 1000 \cdot X^{a_9} + a_6 \cdot 1000 + a_7 \cdot 1000 / X + a_8 \cdot 1000 \cdot X \quad (3)$$

где X – посуточное время хранения корнеплода, 1 – 10 суток; Y_m – интенсивность дыхания, % к стабилизированному состоянию. $R=0,297E-2$.

2) Корнеплоды с отбитым боком и немного головкой:

$$Y_m \% = a_1 \cdot 1000 / X^{a_2} \cdot \exp(a_3 / X^{a_4 \cdot 1E-2}) + a_5 \cdot 1E + 4 / X^{a_9} + a_6 \cdot 1000 + a_7 \cdot 1E + 4 / X + a_8 \cdot 100 \cdot X. \quad R=0,01622. \quad (4)$$

3) Корнеплоды с полностью отбитой головкой:

$$Y_m \% = a_1 \cdot 1000 \cdot X^{a_2} \cdot \exp(a_3 / X^{a_4 \cdot 0,1}) + a_5 \cdot 1000 \cdot X^{a_9} + a_6 \cdot 10 + a_7 \cdot 1000 / X + a_8 \cdot 1000 \cdot X. \quad R = 0,2913E - 2. \quad (5)$$

4) Корнеплоды с отбитым хвостиком:

$$Y_m \% = a_1 \cdot 1000 / X^{a_2} \cdot \exp(a_3 / X^{a_4 \cdot 0,01}) + a_5 \cdot 100 / X^{a_9} + a_6 \cdot 100 + a_7 \cdot 1000 / X + a_8 \cdot 100 \cdot X. \quad R = 0,3276E - 2. \quad (6)$$

5) Разрезанные вдоль корнеплоды:

$$Y_m \% = a_1 \cdot 1000 / X^{a_2} \cdot \exp(-a_3 / X^{a_4}) + a_5 \cdot 1000 \cdot X^{a_9} + a_6 \cdot 1000 + a_7 \cdot 100 / X + a_8 \cdot 100 \cdot X. \quad R = 0,5822E - 3. \quad (7)$$

6) Разбитые вдоль корнеплоды:

$$Y_m \% = a_1 \cdot 1000 / X^{a_2} \cdot \exp(a_3 / X^{a_4 \cdot 100}) + a_5 \cdot 100 / X^{a_9} + a_6 \cdot 1000 + a_7 \cdot 1E + 4 / X + a_8 \cdot 100 \cdot X. \quad R = 0,3837E - 2. \quad (8)$$

7) Корнеплоды, ударенные 8 раз (столько раз они ударяются при механизированной уборке и погрузочно-разгрузочных работах):

$$Y_m \% = a_1 \cdot 1000 / X \cdot a_2 \cdot \exp(a_3 \cdot X^{a_4 \cdot 0,01}) + a_5 \cdot 100 / X^{a_9} + a_6 \cdot 1000 + a_7 \cdot 1E + 4 / X + a_8 \cdot 100 \cdot X. \quad R = 0,8025E - 3. \quad (9)$$

8) Корнеплоды всего вороха свеклы при уборке комбайном, включая и цельные, и поврежденные:

$$Y_m \% = a_1 \cdot 1000 / X^{a_2} \cdot \exp(a_3 / X^{a_4 \cdot 0,01}) + a_5 \cdot 1E + 4 / X \cdot a_9 + a_6 \cdot 1E + 4 + a_7 \cdot 1E + 4 / X + a_8 \cdot 1E + 4 \cdot X. \quad R = 0,174E - 2. \quad (10)$$

Во всех сериях опытов по построению ММ (3) - (10) шаг окончания поиска $1E-7$, а число опытов в серии – 10.

9) Совместное моделирование посуточного изменения интенсивности дыхания корнеплодов (%) в зависимости от ранга повреждений при 10-ти суточном хранении (80 опытов):

$$Y_m \% = \left(1000 \cdot a_1 / X_1 \cdot a_2 \cdot \exp(a_3 / X_1^{a_4}) + 100 \cdot a_5 \cdot X_1^{a_6} + a_8 \cdot X_1 \right) / X_2^{a_{12}} + a_9 / (X_1 \cdot X_2) + a_{10} / X_2 + a_{11} \cdot X_2 / X_1 + a_7 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (11)$$

$R=0,253$, где X_1 – сутки хранения (1-10); X_2 – ранг повреждения (1; 0,9; 0,74; 0,73; 0,7; 0,6; 0,55; 0,4). Средняя относительная погрешность моделирования (11) составила 5,62 %.

Выявлена взаимосвязь среднесуточных потерь сахарозы, % к массе свеклы от интенсивности дыхания, в мг $CO_2/(ч \cdot кг)$ для наиболее типичных разрушений целостности корнеплода при механизированной уборке:

$$Y_m = (0,78E - 2 \cdot x^2 + 1,4083658 \cdot x + 0,616213) / 10^3; \quad R=0,836E-3 \quad (12)$$

Зависимость содержания редуцирующих веществ, в % к массе свеклы от времени хранения (в сутках):

$$Y_m = \left(10 \cdot a_1 \cdot x^{a_2} \cdot \exp(-a_3 \cdot 10^{-3} |\ln x|^{a_7}) + a_5 \cdot x^{a_4} + a_6 \right) / 100, \quad (13)$$

где x – время хранения, изменяется в пределах от 1 до 70 суток.; $R=0,751E-2$.

Моделирование образования гнилой массы, в % к массе свеклы, от наличия вентилирования и длительности хранения, сутки:

$$Y_m = \left(\frac{10^5 a_1}{x_1^3} + \frac{10^4 \cdot a_2}{x_1^2} + \frac{10^3 a_3}{x_1} \right) / x_2^{a_6} + a_4 \cdot \exp \left(a_5 \frac{x_1}{x_2} \right)^{0,1615} + a_7, \quad (14)$$

где x_1 – время хранения корнеплодов, изменяется в пределах от 14 суток до 65; x_2 – ранг режима хранения, равный 0,3 или 2. $R=0,325E-2$. Число опытов 8.

Управляющими воздействиями в информационно-управляющей системе регулируемого хранения корнеплодов сахарной свеклы являются подача воздуха и распыленной воды в кагат, периодическая подача распыленного антисептика, определяемые на основе показаний датчиков температуры, влажности и рассчитанных по моделям показателей качества.

Список литературы

1. Косулин, Г.С. Обоснование концептуальных положений теории длительного хранения сахарной свеклы / Г.С. Косулин, И.П. Салтык // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 5. – С. 13–22.
2. Морозов, А.Н. Технология длительного хранения сахарной свеклы / А.Н. Морозов, М.К. Пружин, Л.Ю. Смирнова // Сахар. – 2016. – № 7. – С. 33–35.
3. Костенко Е.И. Причина развития гнилей корнеплодов сахарной свеклы неизвестной этиологии в Центрально-Черноземном регионе РФ // Сахар. – 2016. – № 2. – С. 32 – 34.
4. Косулин, Г.С. Обоснование критерия хранимоспособности сахарной свеклы / Г.С. Косулин, И.П. Салтык, Р.М. Ибрагимов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 4. – С. 39–44
5. Завражнов, А.И. Эффективность вентилируемого хранения сахарной свеклы в условиях Центрально-Черноземного региона / А.И. Завражнов, Р.А. Шрамко, Л.А. Сабетова, А.А. Завражнов, С.М. Кольцов // Сахар. – 2020. – № 8. – С. 20 – 25.
6. Кухар, В.Н. Эффективность переработки сахарной свеклы в зависимости от ее технологических качеств и особенностей ведения процесса. Часть 2. Исследование потерь сахарозы при краткосрочном хранении свеклы и пути их снижения / В.Н. Кухар, А.П. Чернявский, Л.И. Чернявская, Ю.А. Моканюк, П.М. Барабанов // Сахар. – 2020. – № 5. – С. 38–45.
7. Чернявская, Л.И. Эффективность переработки сахарной свеклы в зависимости от потерь сахара при хранении корнеплодов. Часть 3. Химико-фитопатологические показатели сахарной свеклы механизированной уборки после хранения в кагатах / Л.И. Чернявская, Ю.А. Моканюк, В.Н. Кухар, А.П. Чернявский // Сахар. – 2021. – № 1. – С. 36–45.
8. Бартенев, И.И. Влияние различных условий хранения на поражаемость болезнями и израстание маточных корнеплодов сахарной свеклы / И.И. Барте-

нев, С.В. Сащенко, Д.С. Гаврин, А.В. Новикова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 6 (128). – С. 25 – 31.

9. ГОСТ Р 53036-2008. Свекла сахарная. Методы испытаний.

10. Мойсеяк, М.Б. Исследование закономерности искажения определяемой сахаристости в сахарной свекле в зависимости от степени увядания корнеплодов. Часть 3/ М.Б. Мойсеяк, А.П. Чудинов, О.В. Воронина, С.Р. Бойков // Сахар. – 2021. – № 4. – С. 34–39.

11. Методические указания по проведению научно-исследовательских работ по хранению маточников сахарной свеклы. М.: ВАСХНИЛ, – 1983. – С.24–33.

13. Арапов Д.В. Математическое обеспечение информационно-управляющей системы для хранения продукции с ограниченным сроком хранения / Д.В. Арапов, Н.Ю. Юдина, В.А. Курицын, Л.А. Коробова // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17. № 1. – С. 7-18

14. Полуэктов А.В. Использование сторонних библиотек при написании программ для обработки статистических данных / А.В. Полуэктов, Ф.В. Макаренко, А.С. Ягодкин // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 33-41.

References

1. Kosulin, G.S. Substantiation of the conceptual provisions of the theory of long-term storage of sugar beet/ G.S. Kosulin, I.P. Saltyk // Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. – 2019. – No. 5. - pp. 13-22.

2. Morozov, A.N. Technology of long-term storage of sugar beet / A.N. Morozov, M.K. Pruzhin, L.Y. Smirnova // Sugar. – 2016. – No. 7. – pp. 33-35.

3. Kostenko E.I. The reason for the development of rot of sugar beet root crops of unknown etiology in the Central Chernozem region of the Russian Federation // Sugar. – 2016. – No. 2. – pp. 32-34.

4. Kosulin, G.S. Substantiation of the criterion of storage capacity of sugar beet / G.S. Kosulin, I.P. Saltyk, R.M. Ibragimov // Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. – 2019. – No. 4. – pp. 39-44

5. Zavrzhnov, A.I. Efficiency of ventilated storage of sugar beet in the conditions of the Central Chernozem region/ A.I. Zavrzhnov, R.A. Shramko, L.A. Sabetova, A.A. Zavrzhnov, S.M. Koltsov // Sugar. – 2020. – No. 8. –pp. 20-25.

6. Kukhar, V.N. The efficiency of sugar beet processing depending on its technological qualities and the peculiarities of the process. Part 2. Investigation of sucrose losses during short-term beet storage and ways to reduce them / V.N. Kukhar, A.P. Chernyavsky, L.I. Chernyavskaya, Yu.A. Mokanyuk, P.M. Barabanov // Sugar. - 2020. – No. 5. – pp. 38-45.

7. Chernyavskaya, L.I. Efficiency of sugar beet processing depending on sugar losses during storage of root crops. Part 3. Chemical and phytopathological indicators of sugar beet mechanized harvesting after storage in kagats / L.I. Chernyavskaya, Yu.A. Mokanyuk, V.N. Kukhar, A.P. Chernyavsky // Sugar. – 2021. – No. 1. – pp. 36-45.

8. Bartenev, I.I. The influence of various storage conditions on the disease incidence and overgrowth of royal root crops of sugar beet / I.I. Bartenev, S.V. Sashchenko, D.S. Gavrin, A.V. Novikova // Bulletin of the Altai State Agrarian University. -2015. –№ 6 (128). – Pp. 25-31.
9. GOST R 53036-2008. Sugar beetroot. Test methods.
10. Moiseyak, M.B. Investigation of the pattern of distortion of the determined sugar content in sugar beet depending on the degree of wilting of root crops. Part 3/ M.B. Moiseyak, A.P. Chudinov, O.V. Voronina, S.R. Boikov // Sugar. – 2021. –No. 4. –pp. 34-39.
11. Methodological guidelines for conducting research on the storage of sugar beet queen cells. M.: VASHNIL, - 1983. –pp.24-33.
13. Arapov D.V. Mathematical support of an information management system for storing products with a limited shelf life / D.V. Arapov, N.Yu. Yudina, V.A. Kuritsyn, L.A. Korobova // Modeling of systems and processes. – 2024. – vol. 17. No. 1. – pp. 7-18
14. Poluektov A.V. The use of third-party libraries when writing programs for processing statistical data / A.V. Poluektov, F.V. Makarenko, A.S. Yagodkin // Modeling of systems and processes. - 2022. – Vol. 15, No. 2. – pp. 33-41.