

Управление параметрами послеуборочного хранения сахарной свёклы для предупреждения порчи сырья

Д. В. АРАПОВ, д-р техн. наук, зав. кафедрой информационных технологий, моделирования и управления
Л. А. КОРОБОВА, канд. техн. наук, доц. кафедры информационных технологий, моделирования и управления
Н. Г. КУЛЬНЕВА, д-р техн. наук, проф. кафедры технологии броидильных и сахаристых производств (e-mail: ngkulneva@yandex.ru)
ФГБУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Введение

Свекловодческие и свеклоперерабатывающие предприятия – звенья одной цепи. Сахарная свёкла является главным ресурсом для предприятий, поэтому качество сырья играет определяющую роль в количестве и качестве производимого продукта – белого сахара. В соответствии с этим концепция бережливого производства применима к обеим отраслям агропромышленного комплекса.

Первый этап бережливого производства – это грамотное и адекватное функционирование свекловодческих предприятий. Они закладывают основу для достижения главного результата, начиная от посева, выращивания, сбора урожая и заканчивая закладкой корнеплодов на полевое хранение. Потери в период хранения приводят к значительному сокращению урожая в целом и количества получаемого белого сахара. Задача прогнозирования потерь и подготовки мероприятий по их предотвращению является предметом многочисленных научных разработок.

Проведённые исследования свидетельствуют, что свекловичные кагаты можно рассматривать как биологическую систему, в которой происходят некоторые биотические взаимодействия. Для описания динамики процессов, происходящих в местах хранения свёклы, так называемых сложных биоценозов, необходимо знать степень взаимного влияния зависимых организмов. Свеклосахарное производство нуждается в информатизации в области прогнозирования возможных потерь. С математической точки зрения используют конечно-разностные уравнения, системы дифференциальных или разностных уравнений, регрессионные модели.

Снижение качества сырья происходит по многим причинам. Основной причиной можно смело назвать деятельность микроорганизмов, потребляющих сахарозу корнеплодов и затрудняющих переработку свёклы. Полностью исключить этот процесс из хранения свёклы нельзя. Сегодня существует множество мероприятий, направленных на снижение послед-

ствий микробиологической порчи сырья, но не на прогнозирование его развития. Хотя такие методы значительно облегчили бы принятие решений о дополнительных инвестициях или об изменении условий хранения свёклы.

Второй этап бережливого производства – транспортировка свёклы на переработку. Проблем много: огромные площади посевов, удалённость полей от перерабатывающих предприятий, качество дорог, погодные условия, разные мощности заводов. Процесс транспортировки тесно связан с сохранностью корнеплодов. Одним из результатов прогнозирования является прогноз потерь сахарной свёклы в зависимости от внешних условий хранения и установление своевременного вывоза корнеплодов на переработку.

Третий этап бережливого производства – переработка корнеплодов на предприятиях. Ритмичная работа и повышение производительности сахарных заводов возможны только при бесперебойном обеспечении их сырьём, что продемонстрировали условия прошлого сезона.

Результаты и их обсуждение

Как говорилось выше, качество корнеплодов зависит от условий хранения. Важнейшим из них является профилактика заражения сырья. Из сезонных наблюдений последних лет выявлена наиболее опасная гниль – афаномицетная. Опытным путём установлено, что фунгицидная обработка профилактике такого вида грибковой инфекции не помогает. Поражённые корнеплоды теряют продуктивность и сохранность в послеуборочный период.

Основные потери во время хранения сахарной свёклы в кагатах приносит кагатная гниль, вызываемая грибом *Botrytis cinerea* в комплексе с другими микроорганизмами (проявление биоценоза). Наиболее активное развитие гриба и обильное образование им спор происходит при высокой относительной влажности в кагате, близкой к 100 %, и при температуре +(25–30) °С. Прорастание конидий этого гриба



наблюдали даже при температуре +5 °С. Однако при температуре +(1–3) °С развитие патогена неактивное [2, 3]. Данные экспериментов [4] приведены в табл. 1. Кроме того, для поддержания сахаристости корнеплодов на оптимальном уровне влажность при хранении сырья не должна опускаться ниже 90–95 %.

На основании известных экспериментов (см. табл. 1) нами проведено математическое моделирование поражения корнеплодов возбудителями гнили.

Таблица 1. Влияние температуры на интенсивность поражения корнеплодов свёклы возбудителями гнили [3, 4]

Температура воздуха, °С	Интенсивность поражения ткани корнеплода на 10-е сутки хранения, %					
	Ph. betae	A. tenuis	S. sclerotiorum	Fusarium sp.	B. cinerea	P. expansum
3	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1,25	5
10	2,5	1,25	7,5	3,75	2,5	7,5
15	7,5	3,75	10	5	3,75	15
18	10	5	15	7,5	5	15
20	15	7,5	20	8,75	6,25	17,5
22	12,5	7,5	22,5	10	6,25	17,5
25	7,5	5	15	11,25	5	20
28	5	2,5	10	10	0	17,5
32	0	0	0	0	0	2,5

Получены следующие модели:
модель роста Ph. betae:

$$C_{Pb} = 1,3339185 \cdot 10^{27} / (t + a_9)^{a_2} \cdot \exp\left(\frac{-363,22368 \cdot 10^{28}}{(t + a_1)^{a_4}}\right) + a_3 \cdot t + 10 \cdot a_5 (t + a_1)^{a_8} + 100 \cdot a_6 / (t + a_1) + 10 \cdot a_7; \quad (1)$$

модель роста A. tenuis:

$$C_{At} = 5,7251706 \cdot 10^{29} / (|t - 9,95|)^{a_2} \cdot \exp\left(\frac{-a_3 \cdot 10^{11}}{(t + a_1)^{a_4}}\right) + a_5 t + 10^4 a_6 / (t + a_1) + 100 \cdot a_7 + 1000 \cdot a_8 \cdot \sqrt{t + a_1}$$

при $t \leq 18$ °С или $t \geq 25$ °С;

$$C_{At} = 10^4 \cdot b_1 / \sqrt{t} + 10^4 \cdot b_2 / t + 10^3 \cdot b_3 \quad (2)$$

при $18 \leq t \leq 25$ °С;

модель роста S. sclerotiorum:

$$C_{Ss} = 10^4 \cdot a_1 / |t - 14,457|^{a_2} \cdot \exp\left(\frac{-a_3 \cdot 10^9}{|t - a_9|^{a_4}}\right) + a_5 \cdot t +$$

$$+ 10 \cdot a_6 / |t - a_9| + 100 \cdot a_7 + a_8 \cdot \sqrt{|t - a_9|}; \quad (3)$$

модель роста Fusarium sp.:

$$C_{Fs} = 100 \cdot a_1 / t^{a_2} \cdot \left(\exp(-a_3 \cdot 10^{-5} \cdot t^{a_4})\right)^{0,67} + 10^{-2} \cdot a_5 t^{2,74} + 100 \cdot a_6 + a_7 / t + a_8 t; \quad (4)$$

модель роста B. cinerea:

$$C_{Bc} = 607 \cdot 10^{27} / (t + a_9)^{a_2} \cdot \exp\left(\frac{-a_3 \cdot 10^{18}}{(t + a_1)^{a_4}}\right) + a_5 t + 10^4 \cdot a_6 / (t + a_1) + 100 \cdot a_7 + 100 \cdot a_8 / (t + a_1)^{0,38135}; \quad (5)$$

модель роста P. expansum:

$$C_{Pe} = 0,681738 \cdot 10^{23} / (t + a_1)^{a_2} \cdot \exp\left(\frac{-a_3 \cdot 10^3}{(t + a_1)^{a_4}}\right) + 100 \cdot a_5 \cdot t + 10^3 \cdot a_6 \cdot \sqrt{t + a_1} + 10^3 \cdot a_7$$

при $t \leq 18$ °С или $t \geq 25$ °С;

$$C_{Pe} = 10^6 \cdot b_1 / \sqrt{t} + 10^6 \cdot b_2 / t + 10^5 \cdot b_3 \quad (6)$$

при $18 \leq t \leq 25$ °С.

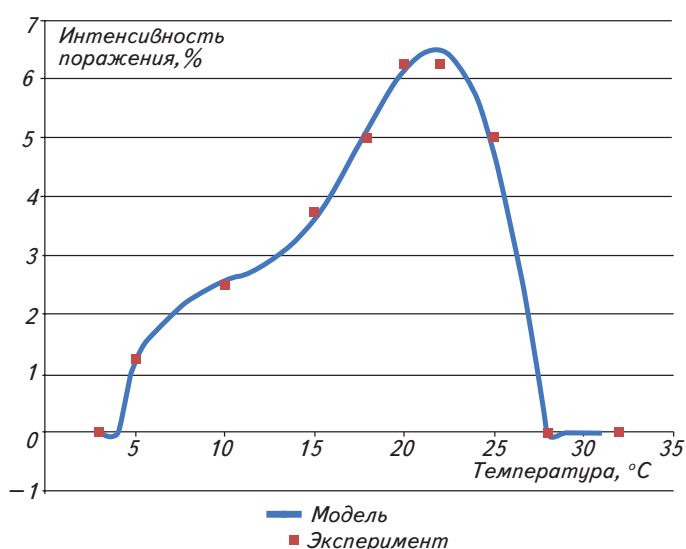
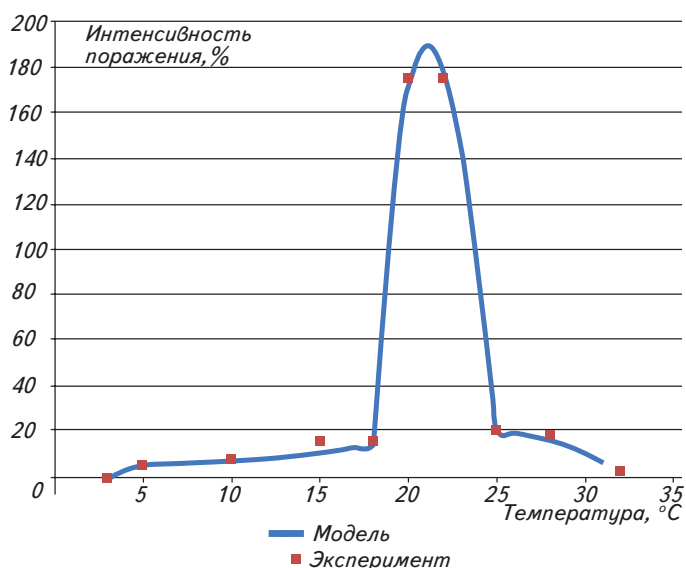
Средняя относительная погрешность моделирования роста грибов составляет 5–6 %. Моделирование осуществляли посредством интерактивной системы идентификации [5–7]. В табл. 2 приведены коэффициенты разработанных математических моделей (1)–(6).

На рис. 1 и 2 приведены экспериментальные и модельные зависимости интенсивности поражения корнеплода соответственно грибами *B. cinerea* и *P. expansum* от температуры. Получаемые на концах кривых отрицательные значения в моделях приравниваются к нулю.

Для обеспечения высокого качества свёклы необходимо учитывать состояние посевного фонда, условия выращивания, физиологическое состояние собранных корнеплодов, режим послеуборочного хранения свёклы (температура, влажность). Условия возделывания сахарной свёклы непосредственно влияют на её физиологическое состояние и способность к хранению. В последнее время усилилось распространение различных возбудителей болезней свёклы, в том числе церкоспороза. Экспериментально установлено, что церкоспороз достаточно устойчив к средствам защиты и приносит существенный вред качеству корнеплодов.

Таблица 2. Коэффициенты математических моделей (1)–(6)

Наименование	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	
Ph. betae	6,1877	17,4007	27,3167	21,7014	-1,0224	7,0305	-0,2748	1,2267	11,5373	
A. tenuis	11,0973	23,2171	0,2542	6,2139	-8,4754	0,1380	-4,8817	0,1108	—	
S. sclerotiorum	0,6398	2,4517	0,1362	6,0818	-5,4492	6,8013	-0,8026	44,2283	0,6965	
Fusarium sp.	-1,9729	0,1360	0,2195	3,9695	-0,8329	1,4373	80,4011	-0,1433	—	
B. cinerea	100,8347	16,9978	0,2480	7,7848	-5,5799	-6,7419	6,7365	-0,4487	0,1434	
P. expansum	8,0353	8,5002	0,1457	0,5936	-0,2195	0,1678	-0,4916	—	—	
Наименование	b_1	b_2	b_3							
A. tenuis	0,3737	-0,8577	-0,3994							
P. expansum	0,2355	-0,5407	-0,2544							

Рис. 1. Интенсивность поражения корнеплода грибом *B. cinerea*Рис. 2. Интенсивность поражения корнеплода грибом *P. expansum*

В рамках данной работы особое внимание уделяется именно послеуборочному хранению свёклы в кагатах с целью создания и контролирования оптимальных условий [8]. Проведённые исследования выявили следующие факты. Независимо от изменения температуры наружного воздуха изменяется, а чаще всего повышается температура в кагате. На поверхности корнеплодов появляются влага и мокрые пятна, образуется «туман». Всё это приводит к возникновению очага поражения и впоследствии переходит в массовое распространение различных грибковых возбудителей.

Предлагается автоматизировать процесс поддержания основных технологических параметров. Для создания благоприятных условий хранения корнеплодов разработана и введена в действие автоматизированная информационная система (АИС). Представленная АИС не является ноу-хау — это способ модернизации системы вентилирования кагатов с помощью информационных технологий [9, 10]. Обязательным условием хранения является отсутствие капельной влаги, которая способствует интенсификации развития грибной плесени. Схема АИС, её основные устройства и принцип действия представлены на рис. 3 [10].

Для получения информации о климатических условиях зоны хранения свёклы необходимо установить датчики температуры и влажности. Они должны находиться как внутри кагата, так и в воздушном пространстве.

При формировании кагатов нужно предусмотреть вентиляционные отводы для предотвращения повышения влажности свекломассы. Воздуховоды внутри кагатов обеспечивают как принудительное, так и естественное вентилирование корнеплодов. Для принудительной аэрации воздуховоды подключают к вентиляторам. При пониженной влажности воздуха для предупреждения процесса подвяливания необходимо разместить водопроводный контур с увлажняющими разбрызгивающими элементами.

Собранная с датчиков информация поступает в программный модуль АИС, расположенный на авто-

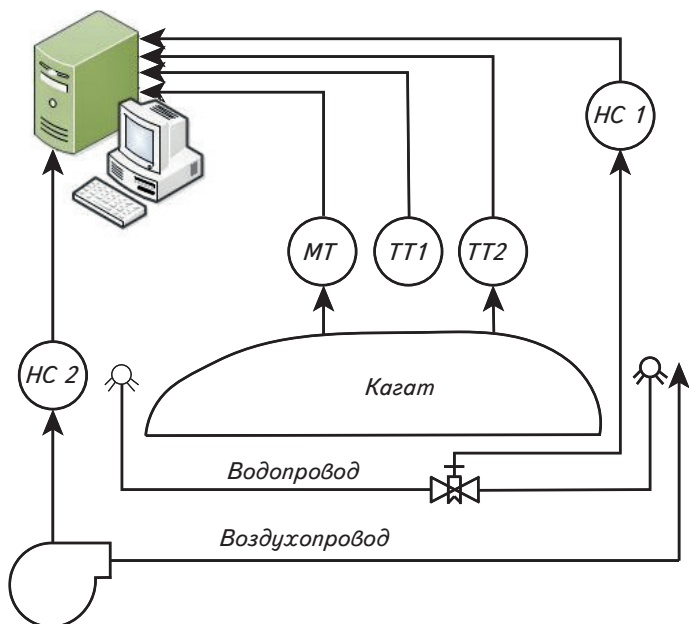


Рис. 3. Технологическая схема АИС: МТ – прибор для измерения относительной влажности воздуха, ТТ – приборы для измерения температуры (ТТ1 измеряет температуру воздуха, ТТ2 – температуру внутри кагата), НС – датчики положения (НС1 определяет степень открытия клапана на водопроводе, НС2 – состояние двигателя вентилятора (вкл/откл))

матизированном рабочем месте менеджера сырьевого отдела. Ядром модуля является управляющий блок, в котором происходит сбор, обработка, агрегирование данных. В этом же блоке при отклонении значений климатических параметров от благоприятных вырабатывают управляющие сигналы. Они поступают на рабочие элементы исполнительных механизмов, которые производят включение или отключение принудительной подачи воздуха либо воды в соответствующие контуры. Для мобильности работы АИС предлагается использовать цифровые датчики и регулирующие устройства.

Структурная схема алгоритма управления представлена на рис. 4. Работа алгоритма соответствует основным требованиям функционирования автоматизированных систем. При повышении температуры внутри кагата выше оптимального значения происходит автоматическое включение принудительной подачи воздуха в вентиляционный контур при условии, что температура наружного воздуха ниже. Снижение влажности воздуха внутри кагата ниже оптимального значения приводит к автоматическому включению увлажняющего контура. При чрезмерном увеличении влажности АИС автоматически прекращает подачу воды и включает вентиляцию.

Предложенный принцип управления условиями хранения свёклы в послеуборочный период способ-

ствует сохранению физико-химических качеств сырья, и прежде всего сахарозы корнеплодов, на оптимальном уровне.

Заключение

На основе экспериментальных данных, полученных из литературных источников, разработаны математические модели роста наиболее распространённых грибов кагатной гнили сахарной свёклы. Установлено, что при температурах ниже 5 °С развитие всех видов возбудителей кагатной гнили незначительно. Максимум роста наблюдается при температурах 20–25 °С.

Предложен способ модернизации существующей системы управления процессом хранения свёклы, которая обеспечит поддержание благоприятных условий внутри кагатов: температуру 0–5 °С, относительную влажность воздуха 92–95 %. Введение в полную эксплуатацию АИС снизит потери корнеплодами сахарозы и массы, тем самым увеличив количество кондиционного сырья, отправляемого на переработку.

Список литературы

- Сахарная свёкла в России: экономика, защита семян, заболевания. Научно-практический совет по сахарной свёкле. Компания «Сингента». 29.06.2021. URL: — <https://www.syngenta.ru/crops/sugarbeet/20210629-sugar-beet-in-russia-economy-seed-protection-diseases> (дата обращения: 10.05.2023).
- Коробова, Л.А. Прогнозирование развития кагатной гнили сахарной свёклы в зависимости от параметров среды / Л.А. Коробова, Н.Г. Кульнева // Хранение и переработка сельхозсырья. — 2020. — № 4. — С. 79–88. — DOI 10.36107/spfp.2020.344. — EDN CPTXDX.
- Стогниенко, О.И. Видовой состав возбудителей кагатной гнили сахарной свёклы при краткосрочном хранении в полевых буртах / О.И. Стогниенко, А.И. Воронцова // Защита и карантин растений. — 2015. — Вып. 1. — С. 26–28.
- Свиридов, А.В. Морфологические признаки и экологические особенности развития возбудителей кагатной гнили столовой свёклы / А.В. Свиридов, С.С. Зенчик // Земляробства і ахова раслін. — 2012. — № 4. — С. 33–37.
- Simulation of the rate of dissolution of sucrose crystals / D.V. Arapov, V.A. Kuritsyn, S.M. Petrov, N.M. Podgornova // Journal of Food Engineeringthis. — 2022. — № 318. 110887 — DOI 10.1016/j.jfoodeng.2021.110887. — EDN KAVVQD.
- Specific mass growth rate of sugar crystals: Probabilistic modeling Food Processing / D.V. Arapov, V.A. Kuritsyn, S.M. Petrov [et al.] // Techniques and Technologythis. — 2021. — № 51 (1). — P. 39–52.

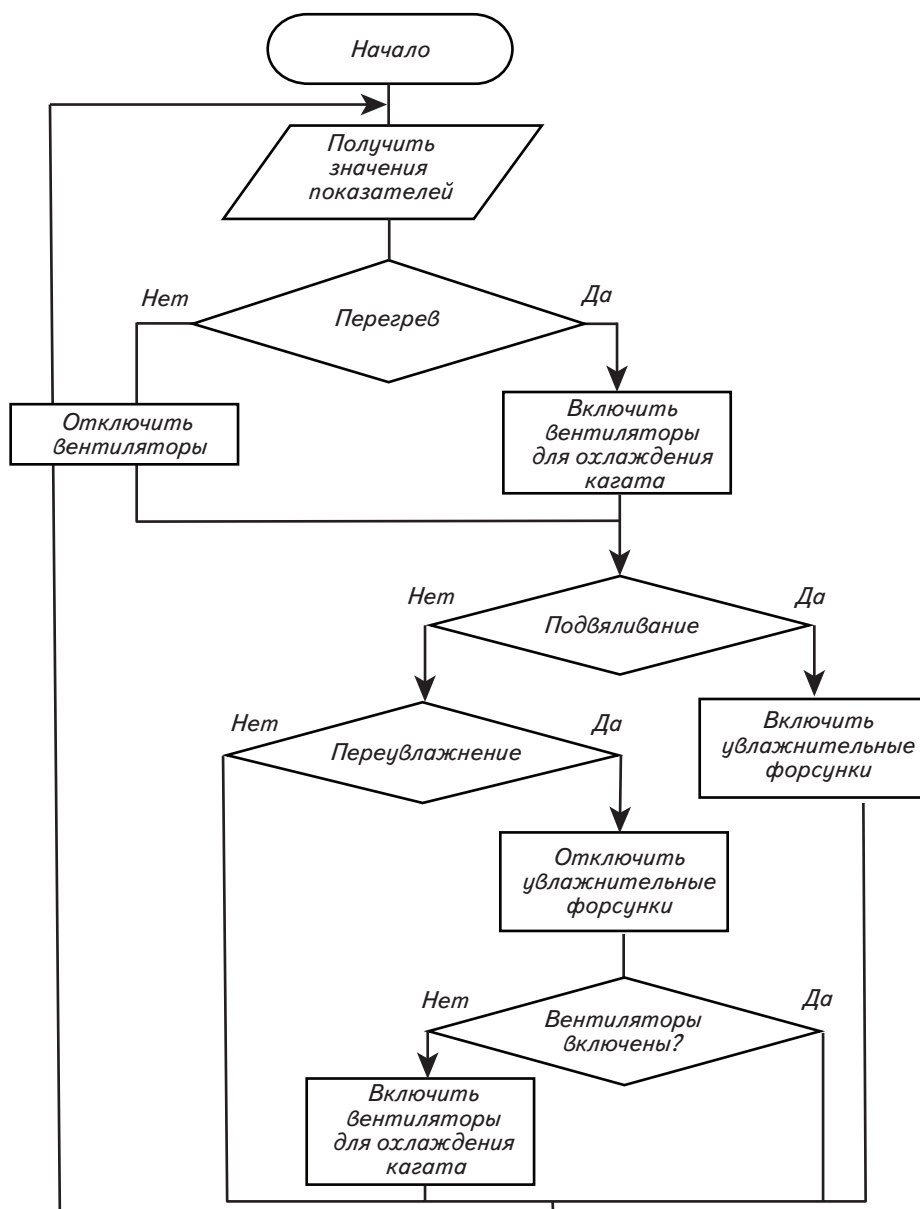


Рис. 4. Схема выработки дискретных управляющих воздействий

7. Simulation of solubility by the example of a sugar solution / D.V. Arapov, V.A. Kuritsyn, S.G. Tikhomirov, V.V. Denisenko // Zuckerindustriethis. – 2019. – 144 (11). – P. 660–664. – DOI 10.36961/si23792. – EDN WRZJJO.

8. Features of storing sugar beets in piles with the purpose of increasing the efficiency of its processing / L.A. Korobova, T.V. Gladkikh, S.V. Chikunov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (P2ARM 2021),

Voronezh, September 21–24, 2021. Vol. 1052. – Voronezh : IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012107. – DOI 10.1088/1755-1315/1052/1/012107. – EDN KGKKQV.

9. Кульнева, Н.Г. К вопросу снижения потерь свекломассы путём прогнозирования развития патогенной микрофлоры / Н.Г. Кульнева, Л.А. Коробова // Сахарная свёкла. – 2022. – № 4. – С. 30–32. – DOI 10.25802/SB.2022.59.28.004. – EDN RYOWZY.

10. Коробова, Л.А. Разработка способов повышения сохранности массы и качества корнеплодов сахарной свёклы в период послеуборочного хранения в кагатах / Л.А. Коробова, Ю.В. Бугаев, У.В. Золотухина // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития : Матер. Междунар. научно-практич. конф. В 2 ч. Вологда, 25 апреля 2018 г. Ч. 1. – Вологда : Маркер, 2018. – С. 39–42. – EDN OSMGRH.

Аннотация. Предметом исследования является процесс хранения сахарной свёклы на предприятиях. Проанализированы причины потерь свекломассы. Разработаны математические модели интенсивности поражения корнеплодов наиболее распространёнными видами кагатной гнили. Предложена схема регулирования микроклимата в кагатах на перерабатывающих предприятиях. Приведено описание автоматизированной информационной системы, предназначенной для поддержания нормативных параметров микроклимата внутри кагатов средствами информационных технологий.

Ключевые слова: сахарная свёкла, кагатная гниль, математические

модели, автоматизированная информационная система (АИС).

Summary. The subject of the study is the process of storing sugar beets in enterprises. The causes of sugar beet mass losses are analyzed. Developed mathematical models of intensity damage to root crops is the most common types of clamp rot. Proposed regulation scheme microclimate in piles at processing plants. The description of the automated information system designed to maintain regulatory microclimate parameters inside the clamps by means of information technologies.

Keywords: sugar beet, clamp rot, mathematical models, automated information system (AIS).