

Прогнозирование развития кагатной гнили сахарной свеклы в зависимости от параметров среды

Коробова Людмила Анатольевна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий»

Адрес: 394036, Россия, город Воронеж, проспект Революции, д.19.

E-mail: ngkulneva@yandex.ru

Кульнева Надежда Григорьевна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий»

Адрес: 394036, Россия, город Воронеж, проспект Революции, д.19.

E-mail: ngkulneva@yandex.ru

Процесс переработки сахарной свеклы является сезонным, при этом хранению подлежит до 60% собранного урожая, что увеличивает длительность производственного сезона до 200 суток. Задача данного исследования – прогнозирование развития микрофлоры в зависимости от физических факторов при хранении сырья. Изменения физиологического и физического состояния свеклы при хранении приводят к потерям в результате жизнедеятельности микроорганизмов, развивающихся на тканях корня. Источниками порчи являются различные бактерии и грибки, находящиеся в воздухе и на поверхности корня: *Botrytis cinerea*, *Fusarium*, *Penicillium* и др. Важным регулирующим фактором, оказывающим влияние на агрессивность возбудителей гнили корнеплодов свеклы, является температура. Заражение сахарной свеклы патогенами наблюдается при температуре 10°C и выше. Экспериментальные данные, полученные различными исследователями (Свиридовым А.В., Стогниенко О.И., Селивановой Г.А.) были использованы для аппроксимации. Обработку проводили на примере *Ph. Betae*. На основе методов математического моделирования предприняты попытки восстановить математические законы, используя полиномы различной степени. Приближение осуществляли с использованием средств Mathcad. На основе имеющихся данных была разработана общая модель расчета интенсивности заражения сахарной свеклы патогенными микроорганизмами кагатной гнили в зависимости от температуры. Полученная модель позволяет на основе изменяющихся экспериментальных данных получать закономерности развития микрофлоры и прогнозировать потери массы корнеплодов в условиях процесса хранения.

Ключевые слова: сахарная свекла, хранение, кагатная гниль, математическая модель

Введение

Сахарная свекла – единственная техническая культура в РФ, из которой в промышленных масштабах извлекают сахар. Процесс переработки сахарной свеклы организован таким образом, что хранению подлежат огромные объемы сырья – до 2/3 собранного урожая. В производственный сезон 2019/20 года валовый сбор сахарной свеклы по данным Росстата составил 50 788 тыс. т, что являлось абсолютным рекордом, и обеспечило длительность производственного сезона на некоторых предприятиях свыше 200 суток.

Процесс хранения сопровождается совокупностью биохимических и микробиологических процессов, в результате которых расходуется сахароза. Задача данного исследования – изучение влияния

физических и микробиологических факторов на эффективность хранения сырья, выбор условий, обеспечивающих сохранение качества свеклы.

Литературный обзор

Основным процессом, протекающим при хранении сахарной свеклы, является дыхание. Это сложный химико-биологический процесс, который даже при хранении абсолютно здоровой свеклы сопровождается потерей части сахарозы. Чем выше температура, при которой хранится свекла, тем интенсивнее протекает процесс дыхания и выше потери сахара (Шпаар, Дрегер, Захаренко, 2000). Изменение физиологического и физического состояния свеклы (увядание, прорастание, подмораживание, механические повреждения)

приводит к повышению температуры в кагатах и усилению дыхания (Свиридов, Дорошкевич, Провириков, Куликовский, 2013, С. 17–20).

При повышении температуры хранящейся свеклы на 10°C потери сахара на дыхание увеличиваются в 2,5–3 раза. Интенсивность дыхания механически поврежденных корнеплодов повышается в 2–3 раза по сравнению со здоровыми (Рисунок 1) (Калинин А. Т., Калинин А. А., 2003, с. 6).

Подмораживание корнеплодов достигается при температуре –(15–18) °C за 15–20 ч, оттаивание начинается при –3,5 °C, что значительно ухудшает качество сахарной свеклы кагате (Вострухин, Чернявская, 2004).

Значительное влияние на естественные процессы имеет степень спелости (Сапронов, Аксёнов, Смирнова, 2015, с. 139–141). Низкая способность к хранению недозревшей сахарной свеклы является следствием высокой интенсивности физиолого-биохимических процессов, приводящих к увеличению потерь массы свеклы и сахарозы.

Кроме естественных и неизбежных потерь сахарозы на дыхание при хранении свеклы в свежем состоянии возможны потери в результате жизнедеятельности бактерий и плесеней, развивающихся на разрушенных тканях корня. Заболеваниям легко подвергается свекла раненая, вялая, подмороженная или оттаявшая после замораживания. Источниками заболеваний являются различные бактерии и грибки, находящиеся в воздухе и на поверхности корня вместе с частицами почвы (Корниенко, Нанаенко, 2000, с. 11). Микроорганизмы вначале

развиваются на отмерших клетках свеклы, затем начинают поражать живую ткань корня.

При хранении свеклы решающее значение имеет её состояние, и в первую очередь отсутствие ранений и механических повреждений. Оттаявшая свекла также является прекрасной питательной средой для микроорганизмов. Изначально на ней развиваются плесени, которые разрушают клетки поверхностного слоя кожицы. Они открывают доступ гнилостным бактериям к внутренним клеткам корня. Результаты фитопатологического состояния корнеплодов после 30 дней хранения показаны в Таблице 1 (Колягин, 2000, с. 182–190).

Таблица 1
Фитопатологические показатели корнеплодов после 30 дней хранения (II категория)

Проросшие корни, %	Заплевневшие корни, %	Загнившие корни, %	Масса гнили, %	Среднесуточные потери, %
55,14	35,22	38,7	0,56	0,03

Таким образом, определены причины потерь массы свеклы и сахарозы в кагатах в период хранения. Изменения физико-химических свойств корнеплодов в период послеуборочного хранения обусловлены патологиями и заболеваниями культуры, а также неблагоприятными условиями хранения. Проблема потерь свекломассы не отражается только фитопатологическим аспектом, а включают ряд сложных биологических, химических и технологических параметров.

Теоретическое обоснование

Для регулирования физиологических процессов чаще всего используется активное вентилирование и укрытия, в качестве контроля - измерение температуры внутри кагата. Кроме того, зачастую приходится обрабатывать сахарную свеклу всевозможными химическими бактерицидными средствами, которые не оказывают положительного влияния на общий состав сахарной свеклы и содержание отдельных химических элементов (Борисюк, 2014, с. 2–9; Кульнева, Селезнева, Свешников, Казакевич, 2017, с. 32–34; Агафонов, Кульнева, Путилина, 2018, с. 46–50; Смирнов, Селиванова, 2020, с. 36–39).

Кагатная гниль – основная причина порчи сахарной свеклы в процессе хранения, вызывается комплексом грибов (*Botrytis cinerea*, *Fusarium*, *Penicillium*

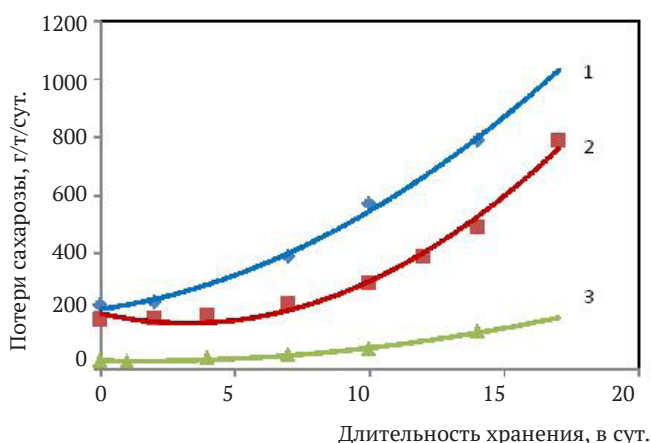


Рисунок 1. Среднесуточные потери сахарозы в зависимости от температуры хранения корнеплодов сахарной свеклы: 1 – неблагоприятные условия хранения; 2 – средние; 3 – благоприятные условия

и др.) и бактерий (Стогниенко, Селиванова, 2012, с. 39–40). Соотношение различных видов микрофлоры варьируется в зависимости от климатических условий вегетации корнеплодов Селиванова, Смирнов, 2019, с. 21–24). Определяющее значение имеет сумма атмосферных осадков на отдельных этапах вегетации (Селиванова, Смирнов, 2019, с. 22–25).

Разложение корней вызывается большим числом микроорганизмов, в состав которых входит свыше 200 видов различных грибов и около 60 видов бактерий. В конце хранения наблюдаются также значительное число видов и форм вторичной микрофлоры, из которых 74,9–91,6% составляют грибы (Свиридов, 2014).

По результатам проведенного фитопатологического анализа корнеплодов свеклы сахарной при хранении видовой состав возбудителей гнили представлен грибами *Phoma betae* Frank, *Penicillium expansum* Link, *Alternaria tenuis* Nees, *Botrytis cinerea*, *Sclerotinia sclerotiorum* (lib) de Bary, а также представителями родов *Fusarium* и *Verticillium* (Земцов, 2017; Стогниенко, 2019). Распространенность гнили на свекле сахарной находилась на уровне 51,7 – 100%, а вредоносность 3,6 – 34,6% (Таблица 2).

Патогенный комплекс возбудителей кагатной гнили сахарной свеклы довольно стабилен: основные роды и виды (*B. cinerea*, *Penicillium* sp., *Fusarium* sp.) ежегодно поражают корнеплоды при хранении, меняется лишь их частота встречаемости и доля в зависимости от срока хранения, экзогенных факторов (Стогниенко, 2015, с. 27). Наибольшей агрессивностью по отношению к корнеплодам свеклы обладают *S. sclerotiorum*, *P. expansum* и *Ph. Betae* (Селиванова, 2010; Свиридов, 2012).

Таблица 2
Видовой состав возбудителей кагатной гнили

Возбудитель	Частота встречаемости, %
<i>Fusarium</i>	42
<i>S. sclerotiorum</i>	24
<i>B. cinerea</i>	18
<i>A. tenuis</i>	6
<i>Ph. betae</i>	3
<i>P. expansum</i>	7

Установлено, что степень инфицирования корнеплодов во многом зависит от влажности воздуха и наиболее интенсивно происходит при наличии капельножидкой влаги (Свиридов, 2016).

Объекты и методы исследований

Работа носит исследовательский характер. Научная новизна исследования обусловлена использованием методов математического моделирования для обработки больших объемов информации в сфере микробиологии патогенов.

Цель работы - исследование динамики биосистемы в период послеуборочного хранения сахарной свеклы с целью прогнозирования потерь свекломассы для корректировки политики хранения и вывоза сахарной свеклы с полей. Это принципиально новый подход, не имеющий аналогов.

Выведена математическая модель изменения интенсивности развития небактериальных возбудителей кагатной гнили в зависимости от изменения температуры; предложены способы описания динамики биосистемы в целом; предложен способ расчета количества заражения сахарной свеклы кагатной гнилью без связанности со временем.

Исследования проведены на базе О.О. «Сельхозинвест» Тербунского района Липецкой области с 29 сентября 2018 года по 27 декабря 2018 года. Объектом исследования являлась сахарная свекла, заложенная для промышленного хранения на периферийных свеклопунктах. В результате анализа характеристик корнеплодов выявлены элементы схожести хранения. В качестве исходных данных биосистемы для анализа и обработки взяты результаты исследований видовой состава кагатной гнили, полученные в течение последних 10 лет Свиридовым А.В., Селивановой Г.А., Стогниенко О.И.¹

Для проведения исследования использован персональный компьютер Intel Core i5 – 4570, математический пакет Mathcad Prime 3.1 (Договор № ТРУБ 27/01/17 с О.О. «БСГ» от 14.02.2017 г. Mathcad Education – University Edition (50 pack Maintenance Gold).

Для установления математических зависимостей между интенсивностью развития патогенных ми-

¹ Россия: О ситуации на рынке сахара за период с 24 по 28 февраля 2020 года [Электронный ресурс]. URL: <http://sugar.ru/node/30535> (дата обращения: 03.03.2020).

кроорганизмов и температурой были использованы методы нелинейной регрессии. В качестве проверки качества регрессионной модели использовали коэффициент достоверности аппроксимации.

Были применены математические сплайны или сплайн-аппроксимация с условиями склейки и без склейки.

Процедура исследования

1. Задаются начальные данные матричным способом. Начальными данными являются значения параметров и соответствующие значения функций.
2. Задается вид сплайнов на участках их действия. В данном случае это полиномы третьей степени.
3. Путем суммирования кусочных функций получали общую функцию описания закономерности
4. Система MathCad такова, что для качественного вычисления значений коэффициентов необходимо инициировать их ненулевыми значениями. Значения, которые использовали для инициации, были получены в ранних работах.
5. Добавление условий и изменение значений коэффициентов осуществляли так, чтобы они удовлетворяли условию склейки, т.е. соответствовали области возрастания функции и области убывания функции.
6. Расчет коэффициентов модели и построение графика функции: модель строится как гладко-кусочная функция.
7. Рассчитывали коэффициент детерминации, делали выводы об эффективности и адекватности модели.

Результаты и их обсуждение

Температура является определяющим фактором процесса инфицирования, так как влияет на физиологию возбудителя и корнеплода.

В производственных условиях корнеплоды сахарной свеклы закладывают на длительное хранение в кагаты с конца сентября - середины октября. Проведенные исследования показали, что в этот период температура в кагатах была на 3,1–13,1°C выше, чем температура окружающей среды, и составляла 7,0–17,0°C. С учетом складывающегося в кагате температурного режима и высокой травмированности поверхностных тканей корнеплодов сделан вывод, что заражение свеклы возбудителями кагатной гнили происходит не только в полевых условиях, но и во время закладки корнеплодов в кагаты, а также в процессе их хранения (Шкаликов, 2010).

В процессе хранения сахарной свеклы в кагатах, как правило, отмечается повышение температуры, обусловленное ростом активности дыхания корнеплодов, протекающими микробиологическими процессами, а также положительными температурами воздуха в декабре, а зачастую и в январе в связи с потеплением климата. В этот период наибольшую активность проявляют грибы рода *Fusarium* и *P. expansum*, температурный оптимум которых лежит в пределах 20–28°C (Свиридов, Дорошкевич, Просвириков, Куликовский, 2013, с.17–20).

Таким образом, можно выделить все абиотические составляющие данного биоценоза (Таблица 3)

Многолетние наблюдения показывают, что при температуре воздуха в период хранения с конца ноября по декабрь 0+5°C происходит активное развитие патогенной микрофлоры.

Таблица 3
Предельные значения климатических параметров развития возбудителей кагатной гнили

Показатель	Возбудитель					
	Ph. betae	A. tenuis	S. sclerotiorum	Fusarium sp.	B. cinerea	P. expansum
Нижний порог температур, °C	10	10	10	10	5	5
Верхний порог температур, °C	28	28	28	28	25	32
Нижний порог влажности, %	98	98	98	98	98	98
Верхний порог влажности, %	100	100	100	100	100	100

Наиболее критическим периодом для корнеплодов является начальный период хранения в течение 10–12 суток после уборки, так как сопровождается усилением процессов дыхания и потери тургора, что обусловлено значительным травмированием корнеплодов и завершением процесса послеуборочного дозревания.

В комплексе факторов, оказывающих влияние на взаимоотношения между возбудителями гнили и корнеплодами сахарной свеклы, большое значение имеют температура и относительная влажность воздуха в кагате. Температура влияет на рост мицелия возбудителей гнили и развитие болезни, а от влажности зависит сама возможность инфицирования корнеплодов (Сапронов, 2015).

Исходя из этого, весь процесс заражения и распространения болезни можно разделить на подпроцессы, зависящие каждый от одного параметра:

- процесс первичного инфицирования, зависящий от влажности внутри кагата;
- процесс распространения заболевания и вторичного инфицирования, зависящий от температуры. Он обусловлен развитием патогенов на сахарной свекле и заражением соприкасающихся с ними корнеплодов.

Рассмотрим второй подпроцесс, поскольку он вызывает наибольшие потери свекломассы.

Важным регулирующим фактором, оказывающим влияние на агрессивность возбудителей гнили корнеплодов свеклы, является температура². Заражение растений свеклы сахарной патогенами наблюдается преимущественно при температуре 10°C и выше (Таблица 4) (Селиванова, 2007).

Экспериментальные данные таблицы были использованы для аппроксимации. Обработку проводили на примере *Ph. Betae* (Рисунок 2).

Известно из методов математического моделирования, что любую закономерность размерностью n можно описать полиномом $n-1$ степени. Были предприняты попытки восстановить математические законы, используя несколько полиномов³. Приближение осуществлялось с использованием средств Mathcad.

Применяя метод наименьших квадратов, было получено уравнение:

$$y(x) = Ax^3 + B^2 + Cx + D,$$

с коэффициентами: $A = -3,155 \times 10^{-3}$; $B = 0,115$; $C = -0,492$; $D = 0,324$. Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,876$.

Модель в целом описывает поведение гриба. Выпадает точка экстремума, которая является крайне важной. Температура 20°C не является недостижи-

Таблица 4

Влияние температуры воздуха на интенсивность поражения корнеплодов свеклы возбудителями гнили

Температура воздуха, °C	Интенсивность поражения ткани корнеплода (на 10-е сутки),%					
	<i>Ph. betae</i>	<i>A. tenuis</i>	<i>S. sclerotiorum</i>	<i>Fusarium sp.</i>	<i>B. cinerea</i>	<i>P. expansum</i>
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

² Свиридов А.В., Борель Н.П., Брилев М.С., Лукьянюк Н.А., Гринашкевич Е.В., Коломиец Э.И., Купцов В.Н., Бычек П.Н., Просвириков В.В. Слизистый бактериоз сахарной свёклы и научно обоснованные рекомендации по защите культуры от гнилей корнеплодов : практические рекомендации. Гродно: Г.А., 2014. 26 с.

³ Соловьева О.Э., Мархасин В.С., Кацнельсон Л.Б., Сульман Т.Б., Васильева А.Д., Курсанов А.Г. Математическое моделирование живых систем: учебное пособие / под ред. О.Э. Соловьевой. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2013. 325 с.

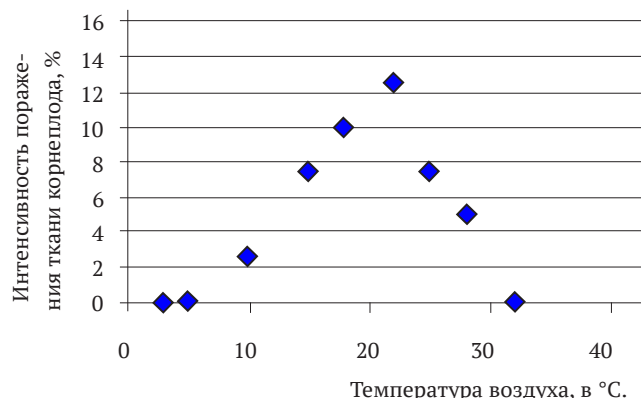


Рисунок 2. График исходных данных влияния температуры на рост конидий грибка *Ph. Betae* (Фомоз сахарной свеклы)

мой в наших широтах. Пропуская или игнорируя подобный пик, можно значительно снизить точность итоговых результатов. Поэтому, несмотря на достаточно высокий коэффициент детерминации, модель нельзя назвать удачной.

Инженерно-математическая система MathCad хорошо аппроксимирует методом наименьших квадратов полиномом до 5-й степени. Для более высоких степеней следует использовать другое программное обеспечение.

Удобным и легким в работе при аппроксимации полиномом 5-й степени показал себя метод аппроксимации с использованием встроенных средств MS Excel:

$$y(x) = 3 \times 10^{-5} x^5 - 0,002x^4 + 0,054x^3 - 0,53x^2 + 2,2676x - 3,4...$$

Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,9522$.

Данная модель лучше описывает поведение микроорганизма на участках: $x \in [0, 10] \cup [30; 35]$. Большой диапазон не требуется, поскольку микроорганизмы в них не развиваются. Но, по-прежнему, не учитывается экстремум. Данную модель так же признаем неудовлетворительной. При более высоких степенях график становится более сглаженным и пологим, но также не включает точку в 20°C.

Проанализировав характер кривой исходных данных, можно предположить, что ее можно описать дробно-рациональной функцией вида:

$$y(x) = 1 / g(x),$$

где $g(x)$ – полином некоторой степени.

Используя дробно-рациональную функцию второй степени, было получено уравнение:

$$y(x) = 1 / (Ax^2 + Bx + C),$$

с коэффициентами: $A = 0,0032$; $B = -0,1322$; $C = 1,4225$ и коэффициентом детерминации: $R^2 = 0,962$.

Данная модель значительно лучше описывает поведение системы, включает в себя верхний экстремум, на сходе появляются лишние данные. Она хорошо описывает закономерность на участке.

Повышение степени функции $g(x)$ может дать положительные результаты. При использовании дробно-рациональной функции третьей степени было получено уравнение:

$$y(x) = 1 / (Ax^3 + Bx^2 + Cx + D),$$

с коэффициентами: $A = -8,22 \times 10^{-5}$; $B = 7,453 \times 10^{-3}$; $C = -0,199$; $D = 1,721$, коэффициент детерминации: $R^2 = 0,926$.

Результат использования кубического полинома в знаменателе дробно-рациональной функции оказался более гладким.

Применение дробно-рациональной функции третьей степени с весом позволяет получить уравнение:

$$y(x) = 1 / (Ax^3 + Bx^2 + Cx + D),$$

с коэффициентами: $A = -1,61 \times 10^{-5}$; $B = 3,569 \times 10^{-3}$; $C = -0,125$; $D = 1,271$, коэффициент детерминации: $R^2 = 0,946$.

Этот вариант считается самым удачным. Основным недостатком можно назвать плохое описание поведения грибков в нулевых точках. Исходя из предварительных данных, можно сделать вывод, что однозначно описать одной функцией процесс развития патогенов достаточно сложно. Стоит использовать кусочно-гладкую аппроксимацию, разбив диапазон температур на несколько участков и приблизив каждый из них.

Кусочно-гладкая аппроксимация включает в себя множество методов, в результате которых получают функцию вида:

$$f(x) = \begin{cases} g_0(x), & x < x_1 \\ g_1(x), & x_1 \leq x < x_2 \\ \dots & \\ g_n(x), & x_n \leq x < x_m \end{cases}$$

де $f_i(x)$ – гладкие функции⁴. В качестве составляющих часто используют полиномы разных степеней.

Оптимальным описанием может служить метод описания сплайнами с условием склейки. При использовании кубического сплайна с условием склейки была получена следующая функция:

$$f(x) = \begin{cases} a1 \cdot x^3 + b1 \cdot x^2 + c1x + d1, & 3 \leq x \leq 20 \\ a2 \cdot x^3 + b2 \cdot x^2 + c2x + d2, & 3 \leq x \leq 20 \end{cases}$$

где $a1 = -1,781 \times 10^{-3}$; $b1 = 0,091$; $c1 = -0,435$; $d1 = -8,093 \times 10^{-3}$,

$a2 = 0,027$; $b2 = -2,099$; $c2 = 52,993$; $d2 = -420,459$.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,96$ показывает высокую точность. График хорошо описывает экспериментальные данные, точек разрыва нет (Рисунок 3).

Результат превосходит описание просто сплайнами. Кроме высокой точности получаем непрерывность.

После проведения нескольких аппроксимаций разной степени сложности можно сделать заключение, что поведение возбудителя сложно описать конкретной функцией. Это обусловлено тем, что данные, используемые для исследований, не являются непрерывной характеристикой, а получены из десяти различных экспериментов при разных температурах. Наиболее быстро колонии растут при 20°C – эта температура наиболее оптимальна

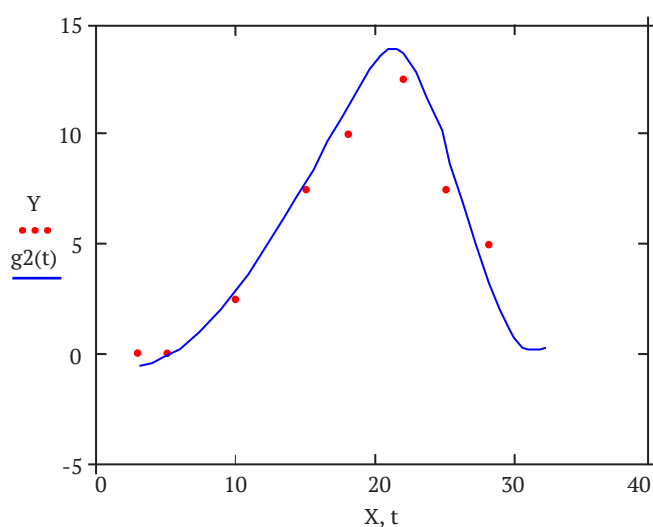


Рисунок 3. График полученной функции и исходных данных

для развития данного гриба. При более высоких или более низких температурах развитие происходит медленнее. При температуре свыше 32°C колонии погибают.

Исследования, проведенные на других микроорганизмах, экспериментальные данные о поведении которых приведены в таблице 3, подтвердили возможность применения данного подхода к прогнозированию их поведения в выбранных граничных условиях.

Выводы

Поскольку наиболее серьезной проблемой свекло-сеющих предприятий является развитие кагатной гнили в период хранения корнеплодов сахарной свеклы, для понимания масштабов потерь, приносимых ею, была тщательно изучена микробиология патогенов, рассмотрено влияние на их развитие и рост окружающей среды, и влияние внешних климатических условий на микроклимат кагата в целом.

Кагатная гниль – крайне опасное поражение сахарной свеклы, препятствующее переработке корнеплодов. При количестве гнилой массы 8–10% и больше получение белого сахара затруднено. При этом использовать корнеплоды на корм животным также нельзя: гнилая масса свеклы не только не имеет кормовой ценности, но и вызывает болезни животных в силу присутствия в ней микотоксинов.

На основе имеющихся данных была разработана общая модель расчета интенсивности заражения сахарной свеклы патогенными микроорганизмами кагатной гнили в зависимости от температуры в кагате.

Микроорганизмы постоянно развиваются, мутируют и изменяются. Следовательно, меняются их реакции на климатические параметры. Достоинство выведенной модели заключается в том, что на основе экспериментальных данных легко можно получить коэффициенты в уравнении и построить ее к меняющимся условиям.

Благодарности

Просим выразить благодарность ученым, результаты исследований которых были использованы при создании математической модели изменения

⁴ Фадеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента: учебное пособие. Н.Г., 2010. 122 с.

интенсивности развития небактериальных возбудителей кагатной гнили в зависимости от температуры: доктору сельскохозяйственных наук Свиридову А.В., доктору биологических наук Стогниенко О.И., кандидату сельскохозяйственных наук Селивановой Г.А.

Литература

- Агафонов Г.В., Кульнева Н.Г., Путилина Л.Н. О технологическом качестве сахарной свёклы, поражённой сосудистым бактериозом // Хранение и переработка сельхозсырья. 2018. № 1. с. 46–50.
- Борисюк П.Г. Особенности химического состава корнеплодов и их изменения во время хранения // Вестник сахарников Украины. 2014. № 11(102). с. 2–9.
- Вострухин Н.В., Чернявская Л.И. Потери сахарозы и их снижение при хранении сахарной свеклы. Минск: Агропромиздат. 2004. 112 с.
- Шкаликов В.А., Белошапкина О.О., Букреев Д.Д., Горбачев И.В., Джалилов С.-У., Минаев В.Ю. Защита растений от болезней / под ред. В.А. Шкаликова. 3-е изд., испр. и доп. М.: КолосС, 2010. 404 с.
- Земцов С.М., Горяйнов А.В. Гнили корнеплодов – много вопросов и мало ответов? // Сахар. 2017. № 4. с. 2–5.
- Калинин А.Т., Калинин А.А. Как улучшить технологические качества сахарной свеклы // Сахарная свекла. 2003. № 5. с. 6.
- Колягин Ю.С. Сахарная свекла // Биологизация и адаптивная интенсификация земледелия в Центральном Черноземье / под ред. В.Е. Шевченко, В.А. Федотова. Воронеж, 2000. с. 182–190.
- Корниенко А.В., Нанаенко Г.А. Оптимизация условий выращивания при дефиците ресурсов // Сахарная свекла. 2000. № 10. с. 12.
- Лукашова У.В., Бугаев Ю.В., Коробова Л.А. Прогнозирование возможных потерь при хранении сельскохозяйственного сырья в зависимости от погодных условий // Инженерные технологии для устойчивого развития и интеграции образования, науки и производства: международная научно-практическая конференция имени В.И. Вернадского. Тамбов: Издательский центр ФБ.У ВО «ТГТУ», 2020. Т. 2. с. 60–64.
- Кульнева Н.Г., Селезнева И.Г., Свешников И.Ю., Казакевич С.Ю. Контроль показателей сахарной свеклы различного качества при хранении // Хранение и переработка сельхозсырья. 2017. № 4. с. 32–34.
- Сапронов Н.М., Аксёнов Д.М., Смирнова Л.Ю. Хранение сахарной свеклы разной степени спелости под модифицированным укрытием // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 7. с. 139–141.
- Свиридов А.В. Агробιολογическое обоснование развития гнилей корнеплодов свеклы сахарной и столовой и разработка системы защиты по ограничению их вредоносности в республике Беларусь: автореф. на соиск. ученой степ. д-ра с.-х. наук: 06.01.07 – Защита растений. Горки, 2016. 48 с.
- Свиридов А.В., Дорошкевич Е.И., Просвирыков В.В., Куликовский С.Е. Факторы, влияющие на микроклимат в кагатах сахарной свеклы // Защита и карантин растений. 2013. № 11. с. 17–20.
- Свиридов А.В., Зенчик С.С. Морфологические признаки и экологические особенности развития возбудителей кагатной гнили столовой свеклы // Земляробства і ахова раслін. 2012. № 4. с. 33–37.
- Селиванова Г.А., Смирнов М.А. Состав фитопатогенного комплекса кагатной гнили маточной сахарной свеклы в зависимости от погодных условий // Сахарная свекла. 2019. № 5. с. 21–24. <http://doi.org/10.25802/SB.2019.11.40.005>
- Селиванова Г.А., Смирнов М.А. Видовой состав возбудителей кагатной гнили маточной сахарной свеклы при хранении // Сахар. 2019. № 8. с. 22–25.
- Селиванова Г.А., Стогниенко О.И. Гнили корнеплодов сахарной свеклы // Защита и карантин растений. 2010. № 10. с. 16–17.
- Селиванова Г.А., Стогниенко О.И. Видовой состав возбудителей корневых гнилей сахарной свеклы // Сахарная свекла. 2007. № 1. с. 28–31.
- Смирнов М.А., Селиванова Г.А. Влияние способа обработки перед хранением на величину кагатной гнили маточных корнеплодов сахарной свеклы и ее видовой состав // Сахарная свекла. 2020. № 5. с. 36–39. <http://doi.org/10.25802/SB.2020.29.39.004>
- Стогниенко О.И., Стогниенко Е.С. Видовой состав возбудителей семенной инфекции сахарной свеклы // Сахарная свекла. 2019. № 2. с. 42–43. <http://doi.org/10.25802/SB.2019.93.51.005>.
- Стогниенко О.И., Селиванова Г.А. Видовой состав и характеристика возбудителей кагатной гнили // Сахарная свекла. 2012. № 9. с. 39–40.
- Стогниенко О.И., Воронцова А.И. Видовой состав возбудителей кагатной гнили сахарной свеклы при краткосрочном хранении в полевых буртах // Защита и карантин растений. 2015. Вып. 1. с. 26–28.
- Шпаар Д., Дрегер Д., Захаренко А., Каленская С. Сахарная свекла. Минск: ООО «ФУАинформ», 2000. 258 с.

Predicting the Development of Clamp Rot of Sugar Beet Depending on the Parameters of the Environment

Lyudmila A. Korobova

Voronezh State University engineering technologies "
394036, Russia, Voronezh, Revolution Avenue, 19.
E-mail: ngkulneva@yandex.ru

Nadezhda G. Kulneva

Voronezh State University engineering technologies "
394036, Russia, Voronezh, Revolution Avenue, 19.
E-mail: ngkulneva@yandex.ru

E-mail: ngkulneva@yandex.ru The sugar beet processing process is seasonal, with up to 60% of the harvested crop subject to storage, which increases the duration of the production season to 200 days. The objective of this study is to predict the development of microflora depending on physical factors during storage of raw materials. Changes in the physiological and physical state of beets during storage lead to losses as a result of the vital activity of microorganisms developing on the root tissues. The sources of spoilage are various bacteria and fungi in the air and on the root surface: *Botrytis cinerea*, *Fusarium*, *Penicillium*, etc. Temperature is an important regulating factor influencing the aggressiveness of the causative agents of beet root rot. Infection of sugar beet with pathogens is observed at temperatures of 10°C and above. The experimental data obtained by various researchers (Sviridov A.V., Stognienko O.I., Selivanova G.A.) were used for approximation. The processing was carried out using the example of Ph. Betae. On the basis of methods of mathematical modeling, attempts have been made to restore mathematical laws using polynomials of various degrees. The approximation was carried out using the Mathcad tools. On the basis of the available data, a general model was developed for calculating the intensity of infection of sugar beet by pathogenic microorganisms of clump rot depending on temperature. The resulting model makes it possible, on the basis of changing experimental data, to obtain patterns of microflora development and to predict the weight loss of root crops under storage conditions.

Keywords: sugar beet, storage, clamp rot, mathematical model

References

- Agafonov G.V., Kul'neva N.G., Putilina L.N. O tekhnologicheskoy kachestve sakharnoi svekly, porazhennoi sosudistym bakteriozom [On the technological quality of sugar beets affected by vascular bacteriosis]. *Khrenenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of farm products], 2018, no. 1, pp. 46–50.
- Borisyuk P.G. Osobennosti khimicheskogo sostava korneplodov i ikh izmeneniya vo vremya khraneniya [Peculiarities of the chemical composition of root crops and their changes during storage]. *Vestnik sakharnikov Ukrainy* [Bulletin of sugar producers of Ukraine], 2014, no. 11(102), pp. 2–9.
- Vostrukhin N.V., Chernyavskaya L.I. Poteri sakharozy i ikh snizhenie pri khranении sakharnoi svekly [Chernyavskaya LI Sucrose losses and their decrease during storage of sugar beets]. Minsk: Agropromizdat, 2004. 112 p.
- Shkalikov V.A., Beloshapkina O.O., Bukreev D.D., Gorbachev I.V., Dzhililov S.-U., Minaev V.Y. Zashchita rastenii ot boleznei [Plant protection against diseases]. 3rd ed. Moscow: KolosS, 2010. 404 p.
- Zemtsov S.M., Goryainov A.V. Gnili korneplodov – mnogo voprosov i malo otvetov? [Root rot - many questions and few answers]. *Sakhar* [Sugar], 2017, no. 4, pp. 2–5.
- Kalinin A.T., Kalinin A.A. Kak uluchshit' tekhnologicheskie kachestva sakharnoi svekly [How to improve the technological qualities of sugar beet]. *Sakharnaya svekla* [Sugar beet], 2003, no. 5, pp. 6.
- Kolyagin Yu.S. Sakharnaya svekla [Sugar beet]. In *Biologizatsiya i adaptivnaya intensivifikatsiya zemledeliya v Tsentral'nom Chernozem'e* [Biologization and Adaptive Intensification of Agriculture in the Central Black Earth Region]. Voronezh, 2000, pp. 182–190.
- Kornienko A.V., Nanaenko G.A. Optimizatsiya uslovii vyrashchivaniya pri defitsite resursov [Opti-

- mization of growing conditions with a shortage of resources]. *Sakharnaya svekla* [Sugar beet], 2000, no. 10, pp. 12.
- Lukashova U.V., Bugaev Yu.V., Korobova L.A. Prognozovanie vozmozhnykh poter' pri khraneni sel'skokhozyaistvennogo syr'ya v zavisimosti ot pogodnykh uslovii [Designing a method for combating sugar beet root rot during post-harvest storage to improve the quality of raw materials in the sugar industry]. In *Inzhenernye tekhnologii dlya us-toichivogo razvitiya i integratsii obrazovaniya, nau-ki i proizvodstva: mezhdunarodnaya nauchno-prak-ticheskaya konferentsiya imeni V.I. Vernadskogo* [System Analysis and Modeling of Quality Management Processes in the Innovative Development of the Agroindustrial Comple: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference]. Tambov: Izdatel'skii tsentr F.B.U VO «TGTU», 2020. T, 2, pp. 60–64.
- Kul'neva N.G., Selezneva I.G., Sveshnikov I.Y., Kazakevich S.Y. Kontrol' pokazatelei sakhar-noi svekly razlichnogo kachestva pri khraneni [Control of indicators of sugar beets of various quality during storage]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of agricultural raw materials], 2017, no. 4, pp. 32–34.
- Sapronov N.M., Aksenov D.M., Smirnova L.Y. Khranenie sakharnoi svekly raznoi stepeni spelosti pod modifitsirovannym ukrytiem [Storage of sugar beets of varying ripeness under a modified shelter]. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2015, no. 7, pp. 139–141.
- Sviridov A.V. Agrobiologicheskoe obosnovanie razvitiya gnilei korneplodov svekly sakharnoi i stolovoi i razrabotka sistemy zashchity po ogranicheniyu ikh vredonosnosti v respublike Belarus'. Avtopef. diss. d-ra s.-kh. Nauk [Agrobiological substantiation of the development of root rot of sugar beet and table beet and the development of a protection system to limit their harmfulness in the Republic of Belarus. Abstract of Dr. (Agriculture) thesis]. Gorki, 2016. 48 p.
- Sviridov A.V., Doroshkevich E.I., Prosviryakov V.V., Kulikovskii S.E. Faktory, vliyayushchie na mikro-klimat v kagatakh sakharnoi svekly [Factors affecting the microclimate in sugar beet piles]. *Zashchita i karantin rastenii* [Plant protection and quarantine], 2013, no. 11, pp. 17–20.
- Sviridov A.V., Zenchik S.S. Morfologicheskie priznaki i ekologicheskie osobennosti razvitiya vzbuditelei kagatnoi gnili stolovoi svekly [Morphological signs and ecological features of the development of pathogens of clump rot of table beet]. *Zemlyarobstva i akhova raslin* [Earthmaking and ahova raslin], 2012, no. 4, pp. 33–37.
- Selivanova G.A., Smirnov M.A. Sostav fitopatogen-nogo kompleksa kagatnoi gnili matochnoi sakhar-noi svekly v zavisimosti ot pogodnykh uslovii [The composition of the phytopathogenic complex of clump rot of mother sugar beet depending on weather conditions]. *Sakharnaya svekla* [Sugar beet], 2019, no. 5, pp. 21–24. <http://doi.org/10.25802/SB.2019.11.40.005>
- Selivanova G.A., Smirnov M.A. Vidovoi sostav vzbuditelei kagatnoi gnili matochnoi sakharnoi svekly pri khraneni [Species composition of pathogens of clump rot of mother sugar beet during storage]. *Sakhar* [Sugar], 2019, no. 8, pp. 22–25.
- Selivanova G.A., Stognienko O.I. Gnili korneplodov sakharnoi svekly [Root rot of sugar beet]. *Zashchita i karantin rastenii* [Root rot of sugar beet], 2010, no. 10, pp. 16–17.
- Selivanova G.A., Stognienko O.I. Vidovoi sostav vzbuditelei kornevykh gnilei sakharnoi svekly [Species composition of causative agents of sugar beet root rot]. *Sakharnaya svekla* [Sugar beet], 2007, no. 1, pp. 28–31.
- Smirnov M.A., Selivanova G.A. Vliyanie sposoba obra-botki pered khraneniem na velichinu kagatnoi gnili matochnykh korneplodov sakharnoi svekly i ee vidovoi sostav [Selivanova Influence of the method of processing before storage on the amount of rotten rot of uterine roots of sugar beet and its species composition]. *Sakharnaya svekla* [Sugar beet], 2020, no. 5, pp. 36–39. <http://doi.org/10.25802/SB.2020.29.39.004>
- Stognienko O.I., Stognienko E.S. Vidovoi sostav vzbuditelei semennoi infektsii sakharnoi svekly [Species composition of causative agents of seed infection of sugar beet]. *Sakharnaya svekla* [Sugar beet], 2019, no. 2, pp. 42–43. <http://doi.org/10.25802/SB.2019.93.51.005>
- Stognienko O.I., Selivanova G.A. Vidovoi sostav i kharakteristika vzbuditelei kagatnoi gnili [Species composition and characteristics of pathogens of clump rot]. *Sakharnaya svekla* [Sugar beet], 2012, no. 9, pp. 39–40.
- Stognienko O.I., Vorontsova A.I. Vidovoi sostav vzbuditelei kagatnoi gnili sakharnoi svekly pri kratkosrochnom khraneni v polevykh burtakh [Species composition of pathogens of clump rot of sugar beet during short-term storage in field piles]. *Zashchita i karantin rastenii* [Plant protection and quarantine], 2015, vol. 1, pp. 26–28.
- Shpaar D., Dreger D., Zakharenko A., Kalenskaya S. *Sakharnaya svekla* [Sugar beet]. Minsk: OOO «FUAinform», 2000, 258 p.