

В.Н. Радионенко,

к. т. н., доцент

*кафедры «Холодильной и торговой техники», Донецкий национальный университет
экономики и торговли имени Михали Туган-Барановского.*

Ю.В. Пьянкова,

асс. кафедры «Холодильной и торговой техники»,

*Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михали Туган-Барановского*

А. Б. Кудрин,

к. т. н., доцент

*кафедры «Холодильной и торговой техники», Донецкий национальный университет
экономики и торговли имени Михали Туган-Барановского.*

В. П. Данько,

к. т. н., доцент

*кафедры «Торговли и общественного питания», Краснодарский филиал Российского
экономического университета им. Г.В. Плеханова.*

МЕТОДЫ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКОВ ХОЛОДИЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

METHODS OF NEURAL NETWORK FORECASTING THE COLD STORAGE MATERIALS PLANT

Аннотация: Рассмотрено использование компактных модулей с модифицированной атмосферой (ММА) в технологии холодильного хранения продуктов растительного происхождения в камерах домашних холодильников. На основе ограниченных экспериментальных данных о кинетике порчи яблок в зависимости от различных факторов построены искусственные нейронные сети для предсказания сроков хранения.

Abstract: Modified atmosphere compact modules have been considered as a refrigeration technology tool for phytogenic product storage in the domestic refrigerators. Experimental data on kinetics of deterioration for apples were used to correlate the shelf life and different technological factors via artificial neural networks.

Ключевые слова: холодильное хранение, искусственные нейронные сети, прогноз сроков сохраняемости

Keywords: refrigeration storage, artificial neural networks, shelf life forecast

1. Введение

Увеличение сроков холодильного хранения биологической продукции в условиях контролируемой или модифицированной атмосферы достигается за счет замедления физиологических (респирация, созревание, порча) и микробиологических процессов, происходящих в пищевых продуктах. Разработка компактных модулей с модифицированной атмосферой (ММА) является одной из актуальных проблем технологии холодильного хранения продуктов растительного происхождения, которая направлена на повышение качества растительной продукции. Технологии увеличения сроков хранения: озонирование, регулируемая и модифицированная атмосфера, пленкообразующие композиции, антимикробные и биоактивные пленки, ионизирующие излучения и др. показали свою эффективность в промышленном масштабе, благодаря низкой стоимости и простоте применения [1, 2, 3, 4]. Возможности применения указанных технологий, например, в домашних холодильниках, что значительно расширяет их функциональные возможности и повышает конкурентоспособность, практически не исследованы. Проектирование ММА зависит от типа хранимой продукции и не существует универсального решения, которое бы удовлетворяло всем специфическим критериям для каждого вида продукции [5 - 12]. Создание требуемого состава атмосферы зависит от скорости респирации, массы и вида продукта, площади мембраны, ее толщины, селективной способности, отношения проницаемостей для кислорода и углекислого газа, а также множества других факторов. Разнообразие продуктов требует такого же разнообразия решений при выборе мембран, управляющих процессом газообмена.

Цель настоящей работы – разработать подход к оптимальному выбору эксплуатационных характеристик мембран, которые бы обеспечили требуемые параметры модифицированной атмосферы внутри модуля для увеличения сроков холодильного хранения растительной продукции. Для достижения указанной цели в работе разработана нейросетевая модель прогноза сроков хранения, где входными переменными служат условия хранения и технологические свойства мембраны. В работе рассмотрен компактный модуль с полупроницаемыми мембранами, в котором происходит саморегулируемый газообмен между модифицированной газовой средой внутри ограниченного объема и воздушной средой в камере холодильника [13], [14].

2. Определение показателей качества и сроков хранения растительной продукции

В качестве объекта исследования выбраны яблоки сорта «Ренет Семиренко». Оценка эффективности работы модуля проводилась на основе экспериментальных данных о динамике изменений показателей качества яблок (содержание витамина С, твердость) и состава газовой среды (содержание этилена, CO₂, O₂ и N₂) в процессе хранения [13], [14]. Оптимальный режим для сохранения товарного качества:

температура воздуха $t = (0 \dots +1) \text{ }^\circ\text{C}$;

относительная влажность воздуха $\varphi = (90 \dots 95)\%$.

Дыхание является основным процессом в результате которого изменяется химический состав и пищевая ценность яблок, а также устойчивость к инфекционным и функциональным заболеваниям. Интенсивность дыхания яблок характеризуется количеством выделяемого CO₂, которое для зимних сортов южных районов Украины, Молдавии и России составляет 7,9 – 10 мг/кг ч. Содержание сухих веществ для яблок сорта «Ренет Семиренко» к концу товарного хранения уменьшается на 20 – 25%. Вначале, в течение первых 3-4 месяцев, содержание сухих веществ изменяется медленно, а затем уменьшается все быстрее. Для яблок этого сорта при хранении в МГС и РГС оптимальная температура составляет $t = (2 \dots 3) \text{ }^\circ\text{C}$. Допускается хранение при более низкой температуре, $t = (1 \dots 1,5) \text{ }^\circ\text{C}$, но не ниже 0^oC. Относительная влажность воздуха должна быть не ниже 95%. Чувствительность этого сорта к воздействию CO₂ повышается по мере снижения температуры и повышения относительной влажности воздуха. Предел снижения концентрации O₂ для яблок «Ренет Семиренко» - 2%, так как при более низкой концентрации усиливаются процессы анаэробного дыхания.

Модифицированная среда создается путем организации газообмена между плодами и средой в замкнутом пространстве, а также между наружным воздухом через газообменники (мембраны) из материалов, селективно проницаемых для компонентов газовой среды. Такая среда создается естественным путем за счет «дыхания» плодов. Длительность формирования газовой среды за счет дыхания фруктов и овощей не превышала 20 суток с момента их герметизации.

Для характеристики качества продукции необходимо учитывать множество критериев K_i , которые имеют различные размерности, физический смысл и диапазон изменения. Простое усреднение таких показателей не имеет смысла и необходимо использовать методы многокритериального анализа для построения обобщенных критериев. В работах [14, 15] нами был предложен подход к оценке такого критерия качества на основе схемы Беллмана – Заде [16], в которой окончательное решение достигается как результат пересечения всех нечетких критериев, представленных функциями принадлежности $\mu(X)$:

$$\mu_K(X) = \mu_{K1}(X) \cap \dots \mu_{Ki}(X) \cap \dots \mu_{Kn}(X), i = 1, 2, \dots, n; \quad X \in XP \quad (1)$$

Функции принадлежности показателей качества могут быть выбраны разными способами в зависимости от контекста задачи. В данной работе функции принадлежности, которые сводят все критерии к интервалу $[0..1]$, находили следующим образом. Предварительно выбирали максимальную и минимальную границы критериев. Минимальную границу K_i^{\min} полагали равной нулю, а максимальную («идеальная точка») K_i^{\max} выбирали равной начальной величине, которую фиксировали в начале хранения.

Функция принадлежности для всех нечетких целей представлена в виде:

$$\mu_{Ki} = \begin{cases} 0, & \text{если } K_i(X) > K_i^{\max} \\ \frac{K_i^{\max} - K_i}{K_i^{\max} - K_i^{\min}}, & K_i^{\min} < K_i \leq K_i^{\max} \\ 1, & \text{если } K_i(X) \leq K_i^{\min} \end{cases} \quad (2)$$

Окончательное решение, формирующее обобщенный критерий, определено как пересечение всех нечетких критериев, представленных их функциями принадлежности. В общем случае, данная проблема сводится к стандартной задаче нелинейного программирования: найти такие значения X и λ , при которых выполняются условия:

$$\lambda \leq \mu_{Ki}(X), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

Для двух показателей (например, содержания витамина С в продукте и содержания кислорода в модуле с мембраной) изменение обобщенного критерия, характеризующего деградацию продукта за период хранения, представляет собой убывающую функцию, которая в каждый момент определяется пересечением функций принадлежности каждого из критериев. Значения целевой функции – сроки хранения, находили из кинетических кривых порчи продукта, заранее задавая компромиссное значение обобщенного критерия.

3. Нейросетевая модель зависимости сроков хранения продукта от характеристик мембран и параметров газовой среды

Для оптимального выбора мембран для ММА рассмотрены две категории продуктов (А и В), которые различаются наличием/отсутствием респираторных

свойств. Первая группа делится на 4 подгруппы в зависимости от состава кислорода и углекислого газа, необходимых для увеличения продолжительности сроков хранения. Подгруппа А1 не требует определенного содержания CO₂ и O₂; подгруппа А2, в которую входят, в основном, овощи, требует небольшое содержание кислорода (1-5%) при отсутствии CO₂. Подгруппа А3 (в основном фрукты и некоторые овощи) требует сбалансированного количества обоих газов (1-5% O₂ и 0-5 CO₂); подгруппа А4 требует относительно высокие концентрации CO₂ > 5%. К группе В относятся такие продукты, как мясо, рыба и т.п.

В работе предложена математическая модель, использующая искусственные нейронные сети, для прогнозирования сроков хранения в зависимости от характеристик мембраны, типа продукции и условий хранения для группы А.

Время хранения растительной продукции (Shelf life) (SL) представлено в виде функции от переменных, характеризующих условия хранения и спецификацию мембран:

$$SL = SL(X_1, X_2, \dots, X_8), \quad (4)$$

где X₁ – интенсивность дыхания, X₂ – объем модуля, X₃ – температура, X₄ – относительная влажность, X₅ – интенсивность переноса кислорода, X₆ – селективная проницаемость мембраны, X₇ – толщина мембраны, X₈ – рабочий диаметр мембраны.

Структура нейронной сети, имитирующей систему прогноза сроков хранения в зависимости от входных переменных представлена на Рисунке 1. В качестве обучающей выборки выбраны результаты экспериментальных исследований по увеличению сроков хранения растительной продукции (яблоки). [16], [17]. Обучение проводили методом обратного распространения ошибки [17], [18], в котором распространение сигналов ошибки от выходов нейронной сети к ее входам происходит в направлении, обратном прямому распространению сигналов в нормальном режиме работы. При обучении решали задачу минимизации функции ошибки:

$$\min \sum_{i=1}^p (y_i - y_i^0)^2$$

(5) где y_i – реальное, а y_i^0 – идеальное (заданное) значения для i -го выхода.

Подстройка весовых коэффициентов синаптической связи w_{ij} между узлами искусственной нейронной сети (Рисунок 1) i и j осуществляется при помощи эмпирического коэффициента скорости обучения [18]. Для подгруппы А2 использовали 2 скрытых слоя. Первый содержал два нейрона, второй – один. В качестве передаточных

функций использовали гиперболический тангенс – tansig и линейную функцию – purelin . Программа расчета SL реализована в среде Matlab [19] для продуктов группы А и может быть рекомендована для практического применения. Области применимости модели при выборе необходимой мембраны, обеспечивающей заданные сроки хранения яблок в ММА, ограничены следующими значениями параметров.

Условия хранения

Интенсивность дыхания	= 5...20 мг CO ₂ /кг/час
Температура	= 0...7 оС
Относительная влажность	= 30...95 %
Объем модуля	= 10...30 л
Спецификация мембраны	
Интенсивность переноса кислорода	= 5...10 x 10 ³ см ³ /м ² день
Селективная проницаемость	= 0...2.5
Толщина мембраны	= 20...50 микрон
Рабочий диаметр мембраны	= 20...50 мм

3. Результаты и обсуждение

Основные показатели полимерных мембран, которые были использованы в экспериментах (полупроницаемая мембрана марки СИМА – фирмы НПО «ТЕХНОФИЛЬТР»: диаметр рабочей зоны – $23,0 \pm 0,5$ мм; толщина мембраны – $0,120 \pm 0,020$ мм; площадь мембраны – $4,15$ см². Определение сроков хранения яблок при холодильном хранении проводили для трех альтернативных вариантов [20]:

- изолированный модуль: размещение яблок в герметичной емкости из пластмассы (модуль) с закрытой крышкой;
- модуль с мембраной: размещение яблок в герметичной емкости с селективной вставкой;
- открытый модуль - размещение яблок в емкости из пластмассы с открытой крышкой.

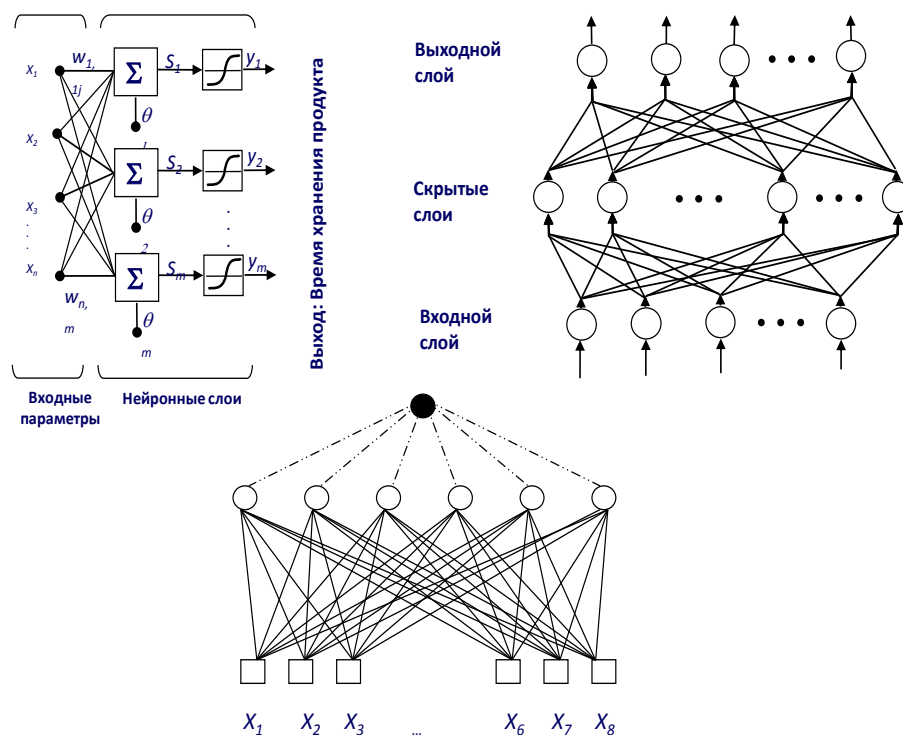


Рисунок 1. Структура искусственной нейронной сети для предсказания сроков хранения растительной продукции

Для изучения влияния площади мембраны на газообмен дополнительно рассматривали 3 варианта, которые включали наряду со стандартной мембраной, половинную и двойную площади поверхности.

Ниже в качестве примера рассмотрено предсказание сроков хранения яблок в модулях с модифицированной атмосферой при следующих заданных условиях.

Условия хранения

Интенсивность дыхания	= 10 мг CO ₂ /кг/час
Температура	= 10С
Относительная влажность	= 30...80 %
Объем модуля	= 10...30 л
Спецификация мембраны	
Интенсивность переноса кислорода	= 10 x 10 ³ см ³ /м ² день
Селективная проницаемость	= 2
Толщина мембраны	= 50 микрон
Рабочий диаметр мембраны	= 30 мм

Результат работы программы предсказывает оптимальные сроки хранения яблок для таких условий 3,7 месяца. На Рисунках 2 и 3 представлены зависимости сроков хранения яблок в модуле с модифицированной атмосферой в зависимости от температуры для различных значений относительной влажности и диаметров мембраны.

Расчеты влияния различных факторов на сроки хранения показывают, что поддержание температурного режима является более существенным по сравнению с регулированием атмосферы внутри модуля. Увеличение сроков хранения растительной продукции в 2 раза требует, чтобы концентрации кислорода и диоксида углерода находились в пределах, приведенных ниже [18 - 22].

«Идеальные» и реальные концентрации O₂ и CO₂ в ММА

Растительная продукция	O ₂ , %	CO ₂ , %
Яблоки - Цель	2...3	1...2
Реальная мембрана	3,2	1,6

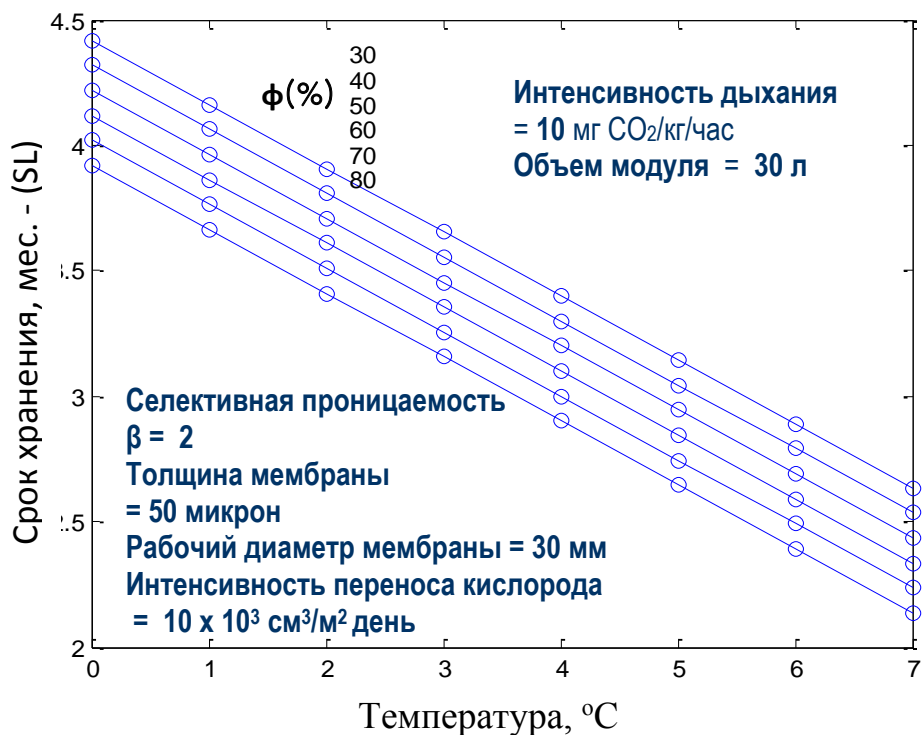


Рисунок 2. Сроки хранения яблок в модуле с модифицированной атмосферой в зависимости от температуры и относительной влажности

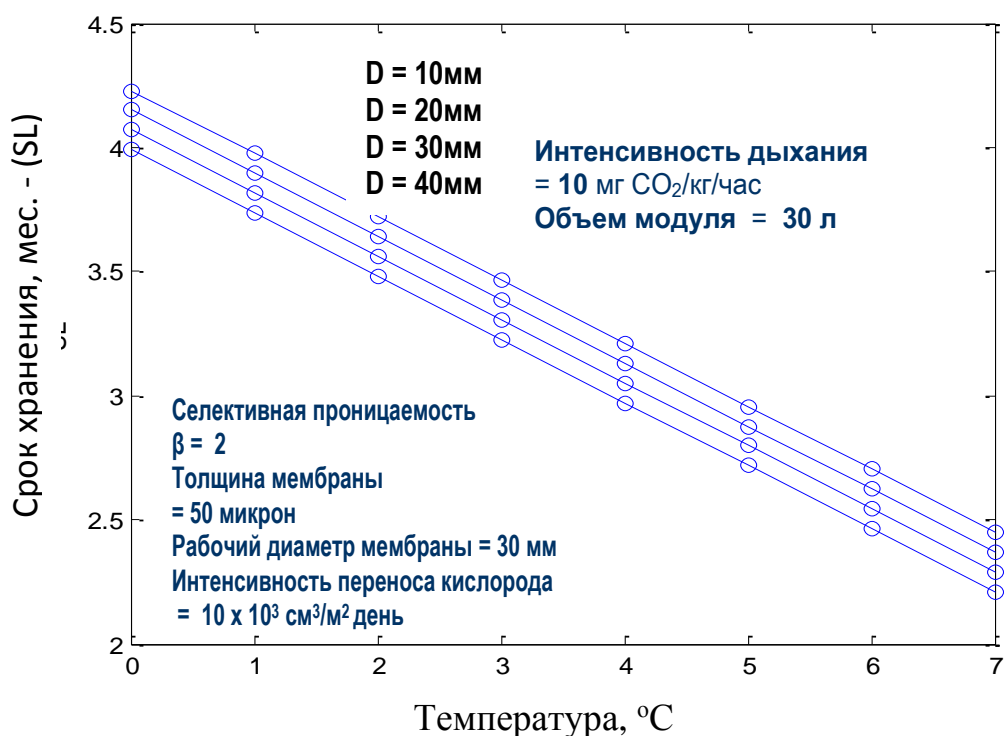


Рисунок 3. Сроки хранения яблок в модуле с модифицированной атмосферой в зависимости от температуры при различных рабочих диаметрах мембран

5. Выводы

Применение полупроницаемых мембран с заранее заданными свойствами позволяет увеличить сроки хранения растительной продукции в условиях модифицированной атмосферы в 2 – 3 раза по сравнению с традиционными методами холодильного хранения.

Многообразие противоречивых условий, которые предъявляются к оптимальным концентрациям кислорода и диоксида углерода для увеличения сроков хранения различных видов продукции в домашних холодильниках, позволяет сделать вывод об отсутствии универсального материала мембраны. Поэтому для каждого из продуктов выбор мембраны должен быть осуществлён индивидуально. Решение указанной проблемы открывает возможность создания т.н. «интеллектуальных» модулей для хранения различных видов продукции.

Оптимальный выбор мембран зависит от материала, варьирования рабочей площади и перфорации мембран, которые регулируют скорости газообмена в модулях. Разработанная модель прогноза сроков хранения растительной продукции базируется на методе искусственных нейронных сетей, при помощи которого установлена взаимосвязь между целевой функцией – временем сохранности продукта и переменными управления: условиями хранения и свойствами мембраны.

Список литературы

1. Безопасность продовольственного сырья и продуктов питания / Л. И. Амбарцумян // Краснодар: «Экоинвест», 2013. – 128 с.
2. Кинетика процессов деградации качества растительной продукции при холодильном хранении в модулях с модифицированной атмосферой / В. Н. Радионенко, В. А. Мазур // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 3 (119). – С.52-55.
3. Локальная продукция цитокинов в ранние и отдаленные сроки после экспериментальной деструкции цилиарного тела криоаппликатором из никелида титана / А. Н. Стеблюк, Н. В. Колесникова, В. Э. Гюнтер, В. Н. Бодня, А. А. Церковная, Л. И. Амбарцумян // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2015. Т. 20. № 3. С. 684-688.
4. Гидравлика, гидро- и пневмопривод [текст]: учебное пособие / В.П. Данько // Донецк: ДонНУЭТ, 2013. – 174с.
5. Использование альтернативных источников энергии и вторичных энергоресурсов в холодильной отрасли / В.П. Данько, А. Б. Кудрин, В. Н. Радионенко // Ладапринт, 2015.- 157с.
6. Комбинированные современные системы теплохолодоснабжения и кондиционирования воздуха / А. В. Дорошенко, В. П. Данько // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНУЭТ, 2011. – Вип. 26. – С. 517–522.
7. Солнечные осушительно-испарительные холодильные системы на основе теплообменных аппаратов с подвижной насадкой / В. П. Данько // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Одесская национальная академия пищевых технологий. Одесса, 2013. – С. 22.
8. Механика : учебное пособие / В.П. Данько // Краснодар: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2015.- 163с.
9. Новая методика расчета теплопритоков в шкаф бытовых холодильных приборов (БХП) производства АТ “НОРД” / В. Н. Радионенко, И. Н. Красновский // Промышленный холод и аммиак: сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф., г. Одесса, 28-30 августа 2006 г. – Одесса, ОГАХ, 2006. – С.61- 65.
10. Оборудование предприятий общественного питания / Ю. Г. Авагян // Краснодар : РЭУ. 2014. - 316с.
11. Оборудование перерабатывающих и пищевых производств: учебник / И. Н. Заплетников, В. В. Осокин, А. Н. Поперечный, В.В. Карнаух и др. // Донецк: ДонНУЭТ, – 314 с.
12. О влиянии интенсификации процесса конденсации на характеристики работы бытового холодильника / Р. В. Брюшков, К. А. Ржесик, М. В. Демин // Современная техника и технологии. 2015. № 10 (50). С. 24-28.
13. Технологическое оборудование предприятий пищевой промышленности / в. В. Осокин, А. С. Титлов, С. Ф. Горыкин, А. Б. Кудрин // Донецк : [ДонНУЭТ] ; Одесса , 2011. – 255 с.
14. Теплообменные аппараты с подвижной насадкой для традиционных и альтернативных энергетических систем [текст] : [моногр.] / А. Н. Горин, А. В. Дорошенко, В. П. Данько // Донецк : Світ книги, 2013. – 327 с.
15. Усовершенствование метода определения теплоизоляционных свойств шкафа многокамерных бытовых холодильных приборов / К. А. Ржесик, Д. К. Кулешов // Современная техника и технологии. 2015. № 9 (49). С. 63-67.
16. Динамика показателей качества растительной продукции при холодильном хранении в модулях с модифицированной атмосферой / В. Н. Радионенко, В. А. Мазур, В.

- П. Кочетов // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНУЭТ, 2009. – Вип.21. – С.274-280.
17. Оценка влияния технологических параметров модифицированной газовой среды (МГС) на качество и длительность хранения овощей и фруктов / В. Н. Радионенко, Ю. В. Пьянкова // Холодильная техника и технология. – Одесса, 2012. – №2(136). – С.76-78.
18. Оценка влияния технологических параметров модифицированной газовой среды (МГС) на качество и длительность хранения овощей и фруктов / В. Н. Радионенко, В. П. Кочетов, Ю. В. Пьянкова // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНУЭТ, 2012. – Вип. 29, т.1. – С. 115 -120.
19. Нейросетевое прогнозирование сроков хранения растительного сырья в модулях с модифицированной атмосферой / В. Н. Радионенко // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – 2010. –2/7(44). – С. 48-51.
20. Нейросетевое прогнозирование сроков холодильного хранения растительного сырья в модулях с модифицированной газовой средой / В. Н. Радионенко // Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. – 2014. –№ 1 (33). – С. 11-15.
21. Применение нейронных сетей для прогнозирования сроков холодильного хранения растительной продукции / В. Н. Радионенко, М. П. Берник, Е. В. Чобану, Ю. В. П'янкова, В. П. Данько // Научный вестник Луганского Национального аграрного университета. – Луганск, 2014. – Вип. 58. – С. 173 - 182.
22. Optimization of kneading dough for pastry / В. Н. Радионенко, М. Берник, В. Бентеа, С. Балта // Around food. Euro Aliment: Galati Romania, October. –№3-5. –2013. – Р. 94-95.