

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ АМПЛИТУДНЫМ И АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ МЕТОДАМИ

В.В. Лисовский, к.т.н., доцент (УО БГАТУ)

Одной из важнейших характеристик сельскохозяйственной продукции, подлежащей обязательному контролю на всех этапах её производства, переработки и хранения, является влажность. Правильный учет количества производственной продукции также невозможен без точного учета её влажности.

В измерении влажности в последние годы широкое распространение получили микроволновые (СВЧ) методы и устройства контроля. Это объясняется очевидными преимуществами измерения влажности на СВЧ и достаточно хорошо разработанной теорией, позволяющей создавать высокоточные устройства контроля [1].

Метод СВЧ-поглощения наиболее распространен в микроволновой влагометрии.

В нем реализуется соотношение:

$$N = 8.686 \cdot \alpha_M \cdot W \cdot \rho \cdot d, \quad (1)$$

где:

N - затухание эл. магнитной волны во влажном материале;

α_M - коэффициент затухания в материале;

W - влажность материала;

ρ - плотность;

d - толщина образца.

Широкое распространение приборов контроля влажности определяется такими достоинствами метода, как простота реализации СВЧ-тракта, его невысокая стоимость, технологичность в производстве, достаточно высокая точность измерений. В нашей республике сертифицированы и серийно выпускаются СВЧ-влагомеры "Микрорадар" 101, 113, основанные на данном методе [2]. На рис. 1. показаны внешний вид влагомеров и варианты установки в некоторых технологических процессах АПК. Основным мешающим фактором в этом методе является плотность материала (для сыпучих продуктов необходимо учитывать еще коэффициент заполнения).

Погрешность, вносимая изменением плотности одного порядка с влиянием самой влажности. Поэтому все однопараметровые приборы требуют специальной подготовки проб (лабораторные и полевые влагомеры), либо однообразного формирования потока (поточные влагомеры). Хотя точность измерения влажности такими влагомерами достаточно высокая (например: "Микрорадар" 101 - имеет абсолютную погрешность 0.35...0.5%; "Микрорадар" 113 - 0.5...1%).

Результаты испытаний влагомеров "Микрорадар" на зерне пшеницы представлены на рис. 2(2,а - МР-101, 2,б - МР-113).

Дальнейшее повышение точности измерений влажности на СВЧ связано с развитием двух и более параметрических методов.

Электромагнитные процессы описываются системой уравнений Максвелла, следствием

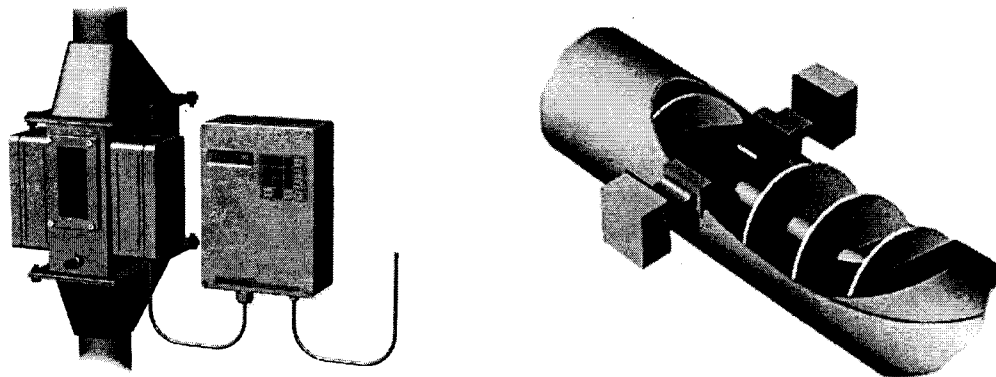


Рис. 1. Внешний вид влагомера "Микрорадар 113" и варианты его установки

которых являются волновые уравнения, решением которых является плоская волна

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - \beta x)}; \\ \vec{H} &= \vec{H}_0 e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - \beta x)}, \end{aligned} \quad (2)$$

с частотой f распространяющаяся вдоль оси x (в положительном направлении) с комплексным волновым вектором $\vec{\gamma}$:

$$\vec{\gamma} = i\omega \sqrt{\epsilon^* \mu^* \epsilon_0 \mu_0} = \alpha + i\beta, \quad (3)$$

где α - коэффициент затухания волны;
 β - волновое число.

Волна (2) распространяется с фазовой скоростью

$$\left. \begin{aligned} \epsilon' &= \frac{\alpha^2 - \beta^2}{\omega^2} c^2 \\ \epsilon'' &= \frac{2\alpha\beta}{\omega^2} c^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Затухание электромагнитной волны часто выражают в децибелах. Если напряженность поля падает от $E(0)$ до $E(x)$, или мощность от $P(0)$ до $P(x)$ по всей длине d материала, то потери в децибелах определяются как

$$N = 20 \log \frac{E(0)}{E(x)} = 10 \log \frac{P(0)}{P(x)} = 8,686 \alpha d \text{ (дБ)} \quad (5)$$

Полагаем, что фронт волны, падающий на влажный материал - плоский, а сам материал будем рассматривать в виде трехкомпонентной плоской модели. Обозначим объемную концентрацию воды через V_B , сухой фазы ма-

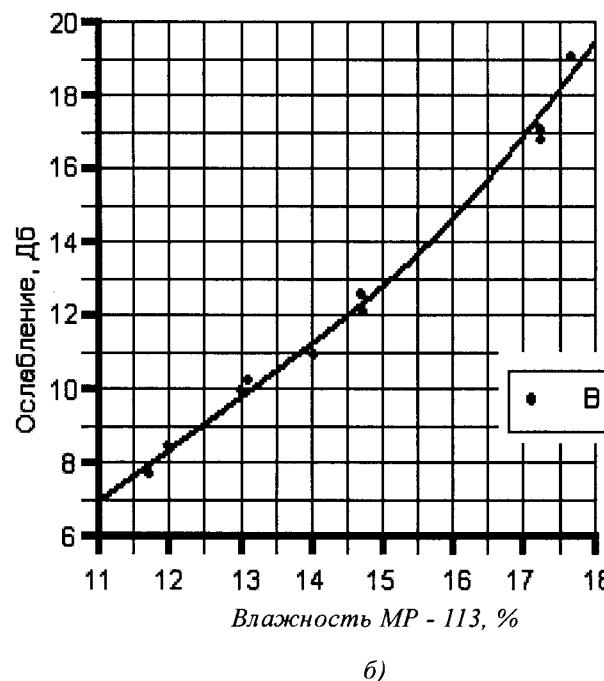
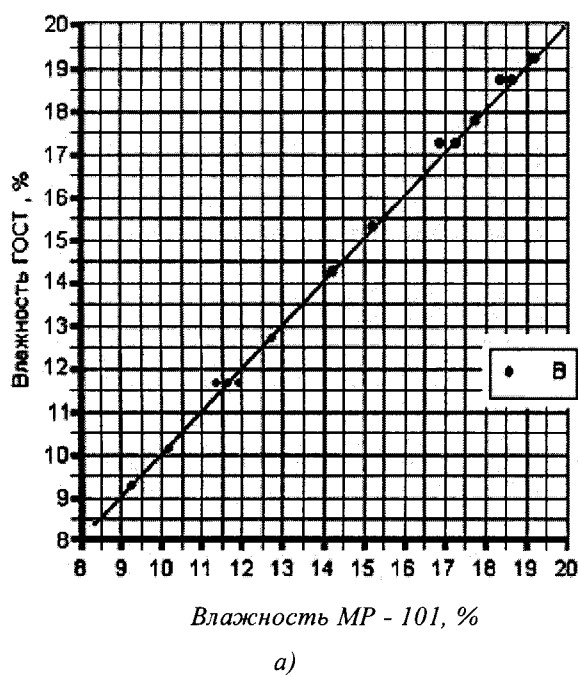


Рис. 2. Градуировочные зависимости СВЧ-влажномеров "Микрорадар" для зерна пшеницы, где В - влажность по имитаторам: а) - для влагомера МР-101; б) - для влагомера МР-113

$v = \frac{\omega}{\beta}$. Так как скорость распространения волны в вакууме $c = \frac{1}{(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}}$ и $\mu=1$ для подавляющего большинства непроводящих материалов, значение

$\gamma = \frac{i\omega}{c} \sqrt{\epsilon^*}$, где

териала через V_C . Тогда объемная концентрация воздуха будет $1 - V_B - V_C$.

Принимая плотность воды, равную единице, получим, что $V_B = Q$, где Q - объемная влажность. В соответствии с принятой моделью влажный материал представляем состоящим из трех плоских слоев воды, сухого вещества и воздуха бесконечной протяженности. Тогда уравнения для α и β запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_B Q + \alpha_C V_C + \alpha_{\Pi} (1 - V_B - V_C), \\ \beta &= \beta_B Q k_1 + \beta_C V_C k_2 + \beta_{\Pi} (1 - V_B - V_C) k_3, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\alpha_B, \alpha_C, \alpha_{\Pi}$ - коэффициенты затухания воды, су-

хого вещества и воздуха;

$\beta_B, \beta_C, \beta_{\Pi}$ - волновые числа каждого компонента;

Q - объемная влажность;

V_C и V_{Π} - объемные концентрации сухого вещества и воздуха;

k, k_1, k_2, k_3 - эмпирические константы, учитывающие структуру материала.

Смысл этих коэффициентов можно уяснить следующим образом. Будем считать, что поры в материале – сферические с радиусом "а" и расположены хаотически. Рассмотрим прохождение плоской волны через сферическую пору, частично заполненную водой. Положим, что $\alpha \ll 1 \ll \chi$, тогда рассеянием можно пренебречь, так как

интенсивность рассеяния $I \propto a^3 / \lambda^4 \ll 1$.

Преломлением волны пренебрегаем, считая слой воды в поре достаточно тонким. Средний путь, прошедший волной в воде, определится как:

$$\langle x \rangle = \frac{2(a - r_1)}{\pi^2} \int_0^{\pi} \sin\theta \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\theta d\theta d\varphi = \frac{8}{\pi^2} (a - r_1), \quad (7)$$

где a - радиус поры, r_1 - радиус поры с водой. Если в единице объема находится n пор, а длина образца d , то средний путь, проходимый волной в воде, будет:

$$\langle x \rangle = \frac{8}{\pi^2} (a - r_1) n \cdot d.$$

Тогда объемная влажность выразится формулой

$$Q = \frac{4}{3} \pi (a^3 - r_1^3) n, \text{ откуда } r_1 = \left(a^3 - \frac{3}{4} \cdot \frac{Q}{\pi n} \right)^{1/3}.$$

Так как $\frac{Q}{\pi n} \ll 1$, то последнее выражение можно разложить в ряд

$$r_1 \approx a - \frac{Q}{4\pi n a^2} \text{ и средний путь будет равен}$$

$$\langle x \rangle = \frac{2Q}{\pi^3 a^2} d. \text{ Затухание во влажном материале связано с поглощением энергии поля СВЧ соотношением}$$

$$\alpha d = \frac{2Q}{\pi^3 a^2} \alpha_B d, \text{ откуда получаем: } \alpha' = \frac{2Q}{\pi^3 a^2} \alpha_B$$

Вводя уравнение связи между объемной влажностью, плотностью и влагосодержанием $Q = \rho W$, получим систему уравнений с тремя неизвестными – Q, ρ и W .

Решение относительно W имеет вид:

$$W = \frac{1}{1 + \frac{\rho_C [\beta - (\alpha / \alpha_B) \beta_B + \beta_{\Pi} (\alpha / \alpha_B - 1)]}{\alpha / \alpha_B (\beta_{\Pi} - \beta_B)}}, \quad (8)$$

где ρ_C - плотность сухой фазы материала. Для принятой слоистой модели уравнение (8) представляет собой функцию преобразования амплитудно-фазового СВЧ-влагомера, или аналитическую зависимость влажности W от α и β .

гомера, или аналитическую зависимость влажности W от α и β .

Таким образом, измеряя ослабление СВЧ-энергии ΔN и фазовый сдвиг $\Delta \varphi$, можно однозначно судить о влажности сыпучих слх материалов без коррекции изменения его плотности (натурного веса).

Известны и другие СВЧ-двухпараметрические методы измерения влажности, инвариантные к влиянию плотности. Так, в [3] используется эмпирическая зависимость:

$$W = \frac{4.21 \cdot N - 0.014 \cdot \Delta \varphi}{3.01 \cdot \Delta \varphi - 7756 \cdot N}, \quad (9)$$

что позволяет измерять влажность пшеницы в потоке с точностью до $\pm 0.5\%$ ($\sigma = 0.2484$). В [4] предлагается зависимость

$$\frac{N}{\Delta \varphi} = \frac{\varepsilon'' r}{\varepsilon' - 1} \cdot \frac{1 + \sqrt{\varepsilon' r}}{2 \sqrt{\varepsilon'}}. \quad (10)$$

Предлагается и ряд других микроволновых методов, позволяющих уменьшить влияние плотности на результат определения влажности, подробный анализ которых приведен в [5], однако, кроме измерения Wiltech [3], практически нет данных о приборных реализациях амплитудно-фазовых СВЧ-влагомеров.

Развитие твердотельной СВЧ-электроники и микропроцессорной техники позволяют рассчитывать на эффективную приборную реализацию предлагаемого метода в соответствии с функцией преобразования (8). Это позволит создать точные конкурентоспособные поточные СВЧ-влагомеры для сельскохозяйственного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисовский В.В. Теория и практика сверхвысокоточного контроля влажности. – Мн.: БГАТУ, 2005. – (В печати).
2. Лисовский В.В. Автоматический контроль влажности движущихся материалов влагомерами «Микрорадар». Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов. – Мн., 2003. - 11-14 с.
3. Mlodrka – Stybel, A: Practical Verification of the Microwave Two – Parameter Method of Moisture Monitoring in Grain in Harvest Time. Conf. Proc. Of the 20th Europe. Microwave Conference. Budapest, 1990, p.p. 1679-1682.
4. Meyer, W.: Schilz, W.: High Frequency Dielectric Data on Selected Moist Material. Journ. of Microwave Power 1982 Vol.17(1),p.p.67-77.
5. Kupfer, K.: Method and Devices for Density – Independent Moisture Measurement. Third Workshop on Electromagnetic Interaction With Water and Moist Substances. Athens, USA, 1999, p.p. 11-19.

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ УДАЛЕНИЯ ВОДОРАСТВОРИМЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ ПРОМЫВКОЙ

А.Ф. Мирончик, к.т.н., доцент (ГУВПО «Белорусско-Российский университет»)

Памяти Анатолия Максимовича Дмитриева

Продолжающееся в настоящее время радиационное воздействие на жителей республики, более чем на 90 % обусловленное долгоживущими радионуклидами цезия, формирует разные по величине и вкладу дозы внешнего и внутреннего облучения в зависимости от радиэкологических условий и уровней загрязнения территорий. Зачастую основным является внутреннее облучение организма, обусловленное потреблением загрязненных продуктов питания, основными из которых являются молоко и молочные продукты, картофель, мясные продукты, хлеб, а также овощи и фрукты. Помимо них, определенная часть населения традиционно использует в пищу продукцию лесов и водоемов – грибы, ягоды, мясо диких животных, рыбу.

Накопленные в начальный период после чернобыльской катастрофы на холодильниках мясокомбинатов и Госрезерва тысячи тонн радиоактивно загрязненного мяса привели к необходимости разработки технологий, позволяющих использовать подобное сырье для производства качественных продуктов питания. Предложенный в первые месяцы после катастрофы на ЧАЭС учеными России метод разбавления загрязненного сырья условно чистым не приводил к снижению коллективной дозы облучения населения. Поэтому по заданию СМ БССР в БелНИКТИ мясной и молочной промышленности были разработаны метод и полупромышленная линия по очистке мяса от радиоактивных веществ, которая была внедрена на Жлобинском мясокомбинате.

Так как мышечная ткань представляет собой сложную многофазную физико-химическую систему, характеризующуюся неравномерным распределением радионуклидов и питательных веществ, то особый интерес вызвало направленное воздействие различных параметров обработки на характер перераспределения радионуклидов при технологической переработке загрязненного мяса.

Исследования проводили с жилованным охлажденным и дефростированным продуктом (говядиной I и II сорта), загрязненным радионуклидами цезия до 33,3 кБк/кг. Мясо измельчали вручную или на мясорубке (в зависимости

от требуемых размеров). Для каждого опыта использовали от 0,6 до 2 кг продукта. Необходимое соотношение разбавления (Т:Ж) достигали добавлением промывающего раствора в перемешивающую емкость. Конструкция узла лабораторной установки позволяла варьировать скоростью перемешивания – 0, 1, 2 и 3 с⁻¹. Продолжительность перемешивания фиксировали секундомером, температуру сырья, воды и раствора – термометрами со шкалой деления 0,1°C. Лабораторный эксперимент включал в себя 4–5 этапов очистки образца и 2–3-кратную повторяемость измерений. Если после перемешивания по условиям эксперимента предусматривался отжим, то его осуществляли через лавсановую ткань с постоянным по времени усилием в 49 или 98 Н. В экспериментах без отжима промывной раствор сливали самотеком. Для всех опытов, а иногда и для каждого этапа проводили анализы на содержание белков и сухих веществ в исходном и конечном продуктах, по итогам серий опытов определяли содержание жиров, микро- и макроэлементов, аминокислотный состав.

После отжима промывной раствор направляли на отделение белков, которое проводили коагулированием или ультрафильтрацией, с дальнейшим их возвратом в отжатое после промывки мясо для непосредственного производства продукции.

Удельную активность образцов измеряли на программном управляемом комплексе технических средств контроля загрязнения внешней среды с детектором БДЭГ–13П (предел чувствительности 18,5 Бк/кг при массе пробы 0,5 кг, ошибка измерения не более 10 %), при промышленных испытаниях – на спектрометре «Robotron–20050» со стинцилляционным детектором 27000 и на многоканальном анализаторе импульсов АИ 1024–95–17.

Статистическая обработка результатов экспериментов проведена проверкой нулевой гипотезы (критерий Фишера).

В ходе лабораторных исследований было проверено влияние на снижение концентрации радиоактивных веществ в мышечной ткани с одновременным контро-

лем качества конечного продукта следующих факторов:

Химический состав раствора. Для определения состава наиболее действенного раствора для снижения концентрации радиоактивных веществ в мясе был использован ряд добавок, использование которых в ограниченном количестве не снижает пищевой ценности мясной продукции. Опыты проводились с 1-, 2,5-, 3- и 12 %-ными растворами NaCl, 3 %-ными растворами $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \times 5,5\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 , NaHCO_3 и 0,0125 %-ным раствором KMnO_4 .

Несмотря на различие химического состава промывающего раствора (рис. 1), существенного преимущества в количестве удаленных радионуклидов из мяса при прочих равных условиях ни одна из проверенных добавок по сравнению с водой не дала. Это, на наш взгляд, подтверждает факт нахождения нуклидов цезия в мышечной ткани преимущественно в несвязанной ионной форме, химически неактивной по отношению к использованным добавкам.

При промывке мяса растворами NaCl, $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \times 5,5\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 и NaHCO_3 значительно возрастает его влагосвязывающая способность, что затрудняет отжим смеси после перемешивания. Факторами, обуславливающими способность мяса поглощать и связывать воду, являются высокий pH мяса (6,4–6,8), мелкое измельчение, низкая температура в процессе измельчения, введение в измельченное мясо раствора с добавками низкой концентрации, а также высокое содержание в мясе соединительной ткани.

Биохимические исследования показали, что, наряду с проникновением химических добавок в мясо, из последнего диффузионно переходит в раствор значительно большее количество витаминов, белковых, экстрактивных и минеральных веществ по сравнению с применением только воды. Например, количество потерь белков зависит от концентрации NaCl в растворе, продолжительности контакта и температуры мяса. Совокупность этих факторов увеличивает общие потери питательных веществ на 10–12 % от их содержания в исходном сырье. Величина потерь обусловлена переходом в раствор белков, заполняющих кровеносную систему, и белков из разрушенных в результате механического воздействия или биохимических процессов клеточек (рис. 2).

По результатам исследований можно утверждать, что при невысокой концентрации соли в растворе (1–3 %) наблюдаются потери белков мяса, превышающие на 2–9 % их потери при его промывках водой. Растворы соли концентрацией до 20 % способствуют растворению белков саркоплазмы, так как при таких концентрациях соли белки не осаждаются. Помимо белков заметно уменьшается содержание ряда минеральных элементов и витаминов. Так, например, потери калия и фосфорных соединений составляют 30–50 % от их начального содержания, количество витамина B_1 уменьшается на 15–25 %, фолицина – на 30–35 %, пантотеновой кислоты – на 10–12 %. Изменений в углеводной системе, в частности в количестве накапливающейся

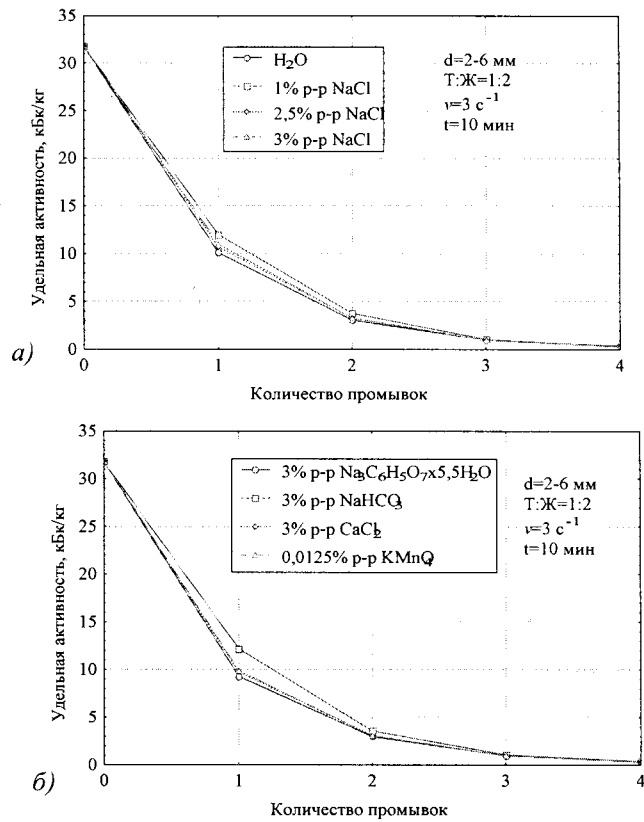


Рис. 1. Зависимость выведения $^{134+137}\text{Cs}$ из мяса от химического состава промывающего раствора

молочной кислоты, практически не происходит.

Следовательно, с точки зрения изложенного материала, использование для удаления $^{134+137}\text{Cs}$ из мяса проверенных химических добавок нецелесообразно, так как это противоречит одной из поставленных задач, а именно, задаче максимально возможного сохранения качества мяса после очистки.

Измельчение мяса и его разбавление промывающим раствором. За две промывки кусочков мяса размерами $20 \times 20 \times 60$ мм при разбавлении Т:Ж = 1:2 удаляется только 65–70 % $^{134+137}\text{Cs}$, а при измельчении 2–6 мм (фарш) – 85–90 %. При указанных выше условиях процент выведения изотопов цезия при отношении Т:Ж = 1:2 и измельчении 16–25 мм (шрот) составил 70–75 %, а при Т:Ж = 1:3 – 85–90 %.

В результате пяти перемешиваний продолжительностью 10 минут каждая со скоростью вращения мешалки 2 c^{-1} и соотношением Т:Ж = 1:2 в промывной раствор при измельчении 2–6 мм переходит до 28 % белков, а при измельчении 16–25 мм при прочих одинаковых условиях – до 26 %. Причем усматривается закономерность, характерная и для удаления $^{134+137}\text{Cs}$: на первых этапах обработки мяса разница в вымывании белков большая; с ростом количества промывок она заметно уменьшается. Эта разница составляет 6 %, 4 %, 2,5 %, 2,2 % и 2 % соответственно после 1, 2, 3, 4 и 5 этапа промывки.