

УДК 637.142.2

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИИ  
КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ НА ПРИМЕРЕ МОЛОЧНОЙ  
СЫВОРОТКИ**

**Кривовязенко Д.И.**

УО Белорусский государственный аграрный технический университет  
*г. Минск, Беларусь*

Молочная сыворотка является ценным пищевым продуктом, состоящим из 93...95 % воды и 5...7 % сухих веществ. Эффективность ее использования зависит во многом от степени выделения сухих веществ и, в первую очередь, белков. Беларусь производит более 8 млн тонн молока в год и занимает четвертое место в мире по экспорту молочной продукции [1]. Переработка молока дает побочный продукт – молочную сыворотку, количество которой приближается к 3 млн тонн в год, содержащую до 20 тыс. тонн белка [1]. Очистка сыворотки от белка значительно уменьшит загрязнение окружающей среды стоками молочных предприятий. Рост использования сыворотки, снижение загрязнения окружающей среды молочными стоками сдерживает проблема – отсутствие эффективного способа выделения белков из сыворотки. Все это доказывает необходимость и целесообразность организации полного сбора и переработки молочной сыворотки как с экономической, так и с экологической точек зрения.

*Ключевые слова:* электрокоагуляция, белковая клетка, количество электричества, концентрация ионов, молочная сыворотка.

**THEORY OF ELECTROCOAGULATION OF COLLOIDAL SOLUTIONS USING  
THE EXAMPLE OF MILK WHEY**

**Kryvaviazenka D.I.**

*EI Belarusian State Agrarian Technical University  
Minsk, Belarus*

Milk whey is a valuable food product consisting of 93... 95% water and 5... 7% solids. The effectiveness of its use depends largely on the degree of release of solids and, first of all, proteins. Belarus produces more than 8 million tons of milk per year and ranks fourth in the world in terms of dairy exports [1]. Milk processing produces a by-product - milk whey, the amount of which is close to 3 million tons per year, containing up to 20 thousand tons of protein [1]. Clearing whey of protein will significantly reduce environmental pollution from dairy effluents. The increase in the use of whey, the decrease in environmental pollution by milk drains is constrained by the problem - the lack of an effective way to isolate proteins from whey. All this proves the need and feasibility of organizing a complete collection and processing of milk whey, both from an economic and environmental point of view.

*Keywords:* electrocoagulation, protein cell, amount of electricity, ion concentration, milk serum.

В настоящее время разработаны или разрабатываются различные методы выделения белков из сыворотки: тепловые, химические, механические, электрохимические, и их сочетания [2].

**Техническое и энергетическое обеспечение**  
**производства аграрной продукции**

Обобщенные показатели способов выделения белков из молочной сыворотки показаны в таблице 1, из которой следует, что основным недостатком известных способов является неполное выделение белков и высокая энергоемкость.

Таблица 1 – Сравнительные показатели способов коагуляции белков молочной сыворотки

| Способ коагуляции            | Конечная температура, °С | Выделение белков, % | Энергоемкость, МДж/кг сыворотки |
|------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Термический                  | 95                       | 35...40             | 0,34                            |
| Термохимический              | 93                       | 40...55             | 0,34                            |
| Электрохимический            | 92                       | 45...50             | 0,28                            |
| Мембранный                   | 70                       | 80...85             | 0,25                            |
| Электрический (предлагаемый) | 28                       | 90...95             | 0,12                            |

Устранить или снизить отмеченный недостаток можно электролитическим способом коагуляции белков суть которого состоит в следующем. Согласно теории Дерягина-Ландау-Фервея-Оверберка устойчивость коллоидной системы зависит от соотношения энергий межмолекулярного притяжения  $W_m$ , электростатического отталкивания  $W_z$ , диполь-дипольного взаимодействия частиц  $W_d$ . Коагуляция наступает тогда, когда суммарная энергия межмолекулярного и диполь-дипольного притяжения ( $W_m+W_d$ ) превысит энергию электростатического отталкивания или же общая энергия системы ( $W$ ) станет меньше или равна нулю.

Суммарная энергия взаимодействия белковых молекул зависит от ряда факторов. Наиболее действенными являются – температура коллоидной среды, напряженность электрического поля, потенциал диффузионной части двойного слоя белковых молекул. Путем моделирования на ЭВМ установлена значимость этих факторов.

Коагуляция белков сыворотки нагреванием возможна при температуре более 323К. Изменением напряженности внешнего электрического поля от 300 до 4000 В/м уменьшает суммарную энергию только на 0,002%, что не является значимым. Наибольший интерес представляет влияние потенциала диффузионной части двойного слоя  $\varphi_0$  на границе раздела поверхность белковой молекулы – коллоидная среда на суммарную энергию  $W$ . Коагуляция начинается при  $\varphi_0=25...30$ мВ.

Известно, что величина потенциала  $\varphi_0$  зависит от концентрации анионов и катионов [3]. Эту концентрацию можно регулировать пропусканием определенного количества электричества через белоксодержащую среду, расположенную между токопроводящими электродами, разделенными между собой токопроводящей мембраной.

**Техническое и энергетическое обеспечение  
производства аграрной продукции**

Допустим, что белковая клетка имеет форму шара, покрытого ионами того или другого знака с поверхностной плотностью  $\rho_0$ . Изменение потенциала на поверхности шара описывают известным уравнением

$$\varphi_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_c} \int \frac{\rho_0}{r} dS, \quad (1)$$

где  $\epsilon_c$  – диэлектрическая проницаемость белковой среды, Ф/м;

$\rho_0$  – суммарная плотность поверхностного заряда белковой клетки, Кл/м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь поверхности белковой клетки, м<sup>2</sup>;

$r$  – радиус клетки, м.

Диэлектрическая проницаемость сыворотки  $\epsilon_c = \epsilon_0\epsilon$ , где  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость сыворотки.

Максимальная коагуляция имеет место при  $\varphi_0 = 0$ , т. е. при  $\rho_0 = 0$ . Оценим, как количество электричества, протекающее через сыворотку, влияет на поверхностный заряд.

Суммарная плотность поверхностного заряда, при учете только ионов  $H^+$  и  $OH^-$  [4]

$$\rho_0 = \alpha_b \rho_b - \alpha_a \rho_a = \frac{\rho_b C_{H^+}^2 + K_a(\rho_b - \rho_a)C_{H^+} - \frac{K_a K_w}{K_b} \rho_a}{C_{H^+}^2 + \left(\frac{K_w}{K_b} + K_a\right) C_{H^+} + \frac{K_a K_w}{K_b}} \quad (2)$$

где  $\rho_a, \rho_b$  – поверхностная плотность заряда кислотных и основных групп, соответственно, Кл/м<sup>2</sup>;

$\alpha_a, \alpha_b$  – доля диссоциированных кислотных и основных групп, соответственно.

$$\alpha_a = \frac{K_a}{K_a + C_{H^+}}, \quad (3)$$

$$\alpha_b = \frac{C_{H^+}}{K_w / K_b + C_{H^+}}, \quad (4)$$

где  $K_a, K_b, K_w$  – константы диссоциации кислотной, основной группы и воды, соответственно [46].

При этом

$$K_a = \frac{C_{H^+} C_{a^-}}{C_{H^+} a^-}; \quad K_b = \frac{C_{OH^-} C_{b^+}}{C_{OH^-} b^+}; \quad K_w = \frac{C_{H^+} C_{OH^-}}{C_{H_2O}}, \quad (5)$$

где  $C_{H^+}, C_{OH^-}$  – концентрация ионов  $H^+$  и  $OH^-$ , г-ион/л;

$C_{a^-}, C_{b^+}$  – концентрация кислого и основного продуктов, соответственно, г-ион/л.

Техническое и энергетическое обеспечение  
производства аграрной продукции

Приравняв в (2)  $\rho_0 = 0$ , получим оптимальную, с точки зрения коагуляции, концентрацию ионов  $H^+$

$$C_{H^+opt} = K_a \left( \frac{\rho_a - \rho_b}{2\rho_b} + \sqrt{\frac{(\rho_b - \rho_a)^2}{4\rho_b^2} + \frac{\rho_a}{\rho_b} \frac{K_w}{K_a K_b}} \right) \quad (6)$$

или оптимальный  $pH$  среды

$$pH_{opt} = -\lg K_a - \lg \left( \frac{\rho_a - \rho_b}{2\rho_b} + \sqrt{\frac{(\rho_b - \rho_a)^2}{4\rho_b^2} + \frac{\rho_a}{\rho_b} \frac{K_w}{K_a K_b}} \right) \quad (7)$$

Если принять  $\rho_a = \rho_b$ , то

$$C_{H^+opt} = \sqrt{\frac{K_a K_w}{K_b}}, \quad (8)$$

$$pH_{opt} = -\lg \sqrt{\frac{K_a K_w}{K_b}}. \quad (9)$$

Уравнения (2), (6) показывают, что плотность поверхностного заряда белковой клетки зависит от вида и концентрации ионов в коллоидном растворе и, в первую очередь, от количества ионов  $H^+$  и  $OH^-$ . При этом возможна оптимальная концентрация этих ионов, при которой  $\rho_0 = 0$ , и, следовательно, коагуляция наиболее вероятна (6), (7).

Как известно, концентрацию ионов в водном растворе можно изменить внесением химических реагентов, что и делают при химических способах коагуляции, или электролизом воды, входящей в состав сыворотки.

Нашими исследованиями установлено, что изменением концентрации ионов в молочной сыворотке, расположенной в анодной и катодной зонах электродной системы позволяет коагулировать до 80...90% белков при температуре не выше 30°C. При этом энергоёмкость коагуляции не превышает 0,06МДж/кг сыворотки (таблица 1).

Основным действующим фактором электролитической коагуляции белков сыворотки является количество электричества, протекающее через коллоидную среду. Количество электричества влияет на электролиз воды в сыворотке, концентрацию ионов  $H^+$  и  $OH^-$ , последние, в свою очередь, влияют на поверхностную плотность зарядов  $\rho_0$  на белковой клетке, ее потенциал и суммарную энергию взаимодействия коллоидных частиц, которая, при условии  $\rho_0=0$ , становится оптимальной для коагуляции белков.

Концентрация ионов  $H^+$  и  $OH^-$  при электролизе воды зависит от количества электричества, протекающего через сыворотку. Количество электричества можно регулировать силой тока, временем обработки, напряженностью электрического поля, параметрами электродной системы электрокоагулятора. Имеет место сочетание

**Техническое и энергетическое обеспечение**  
**производства аграрной продукции**

вышеперечисленных факторов, соответствующее оптимальным условиям коагуляции белков сыворотки.

Применительно к катионам  $H^+$  оптимальное количество электричества для коагуляции белков

$$Q_{\text{opt}}^{A(K)} = \frac{\Delta C_{k_i(a_j)}^{A(K)} F \tau}{\int_0^t n_{k_i(a_j)}(\tau) d\tau} = \frac{\left( \sqrt{\frac{K_a K_w}{K_b}} \pm C_{H^+}^{A_0(K_0)} \right) F \tau}{\int_0^t n_{k_i(a_j)}(\tau) d\tau}. \quad (10)$$

где  $\Delta C_{k_i(a_j)}^{A(K)}$  изменение концентрации вещества за бесконечно малое время  $dt$  в некотором объеме среды;

$F$  – число Фарадея, Кл/моль;

$n_{k_i(a_j)}^{A(K)}(\tau)$  – мгновенное число переноса  $i$ -го катиона ( $j$ -го аниона) в момент времени  $dt$ .

Таким образом, полный потенциал поверхности белковой клетки зависит от плотности поверхностного заряда клетки, который, в свою очередь, определяется концентрацией ионов в сыворотке и, в первую очередь, ионов  $H^+$  и  $OH^-$ .

**Список литературы**

1. Сельское хозяйство Республики Беларусь: [статистический сборник] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь ; редкол.: И. В. Медведева (гл. ред.) [и др.]. – Информационно-вычислительный центр Национального статистического комитета Республики Беларусь, 2019. – 211 с.
2. Короткий, И. А. Современные тенденции в переработке молочной сыворотки / И. А. Короткий, И. Б. Плотников, И. А. Мазеева // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 2. – С. 227–234.
3. Электрохимическая активация: очистка воды и получение полезных растворов / В. М. Бахир [и др.] ; под ред. В. М. Бахира. – ВНИИИМТ : Маркетинг Саппорт Сервисиз, 2001. – 176 с.
4. Заяц, Е. М. Основы электротехнологических методов обработки влажных кормов: монография / Е. М. Заяц. – Минск : Ураджай, 1997. – 216 с.