

## Математическое моделирование процесса электроискровой обработки творожной сыворотки в технологии сывороточных напитков

Оксана Кочубей-Литвиненко, Наталия Вовкодав, Ольга Чернюшок

Национальный университет пищевых технологий, ул. Владимирская 68, 01033 Киев, Украина; (+38066)750-33-08; эл. почта [olgachernyushok@list.ru](mailto:olgachernyushok@list.ru)

Представлены результаты исследований размеров белковых частиц творожной сыворотки, обработанной электроискровыми разрядами при варьируемых параметрах – напряжении и количестве разрядов. Сыворотку обрабатывали на лабораторной электрогидравлической установке при напряжении от 30 до 45 кВ и количестве разрядов от 5 до 25 с шагом 5. В качестве контроля выступала необработанная творожная сыворотка.

Размеры частиц белковой фазы определяли с помощью комплексной системы анализа частиц на анализаторе Zetasizer Nano ZS (Великобритания).

Вследствие электроискровой обработки наблюдалось уменьшение размера белковых частиц и смещение пиков в диапазон размеров до 500 нм. Подтверждена ранее установленная зависимость размера белковых частиц от напряжения и количества разрядов. Наилучшие результаты были достигнуты при напряжении 45 кВ и количестве импульсов 20 и 25. При указанных режимах система приближалась к монодисперсной, количество частиц с размером свыше 300 нм стремилось к 0.

В соответствии с основными принципами оптимизации составлена параметрическая схема процесса обработки творожной сыворотки электроискровыми разрядами, определены входящие (напряжение, количество разрядов) и исходящие факторы (дисперсности системы), установлен и обоснован критерий оптимизации.

В среде математического пакета (МП) MathCad построена математическая модель, описывающая зависимость размеров белковых частиц от основных параметров инновационного способа обработки – от напряжения и количества разрядов.

В результате реализации процесса диспергирования частиц получена исходная табличная функция  $f(x, y)$ , описывающая зависимость размеров частиц белков сыворотки творожной от параметров электроискровой обработки (напряжение, количество импульсов). В среде математического пакета MathCad с помощью комбинации встроенных функций *regress*, *interp* и специальной программы получен аналитический вид приближающей функции  $p(x, y)$  для исходной таблично заданной  $f(x, y)$ .

На основе проведенного полнофакторного эксперимента подобран рациональный режим электроискровой обработки сыворотки при напряжении 45 кВ и количестве разрядов 20, что обеспечивает дисперсность системы, достаточную для замедления процесса осаждения белковых частиц в напитках из сыворотки.

**Ключевые слова:** оптимизация, параметры, сыворотка творожная, электроискровые разряды, размеры белковых частиц, математическое моделирование.

### Введение

Напитки из цельной творожной сыворотки представляют собой значительную ценность, так как содержат все составные части “кладезя” биологически активных и питательных веществ – молочной сыворотки. Согласно нормативным документам, в них допускается выпадение белкового осадка в небольших количествах, но его наличие в некоторой степени может “отталкивать” потребителя, поскольку, как

известно, органолептические свойства в большей степени, чем химический состав и пищевая ценность, влияют на выбор большинства покупателей и формируют спрос на готовую продукцию. К тому же, присутствие осажженного белка негативно отображается на технологичности процесса производства напитков, поскольку частицы белка склонны осаждаться на теплопередающей поверхности пастеризаторов, что не только приводит к

потерям ценного компонента, но и снижает эффективность тепловой обработки, усложняет процесс мойки оборудования, становится невозможной СР-мойка – обязательное условие современного производства.

Очистка сыворотки от белка различными способами (сепарирование, фильтрование, отстаивание, мембранные методы и т. д.), так называемое осветление, позволяет устранить нежелательный осадок, но, к сожалению, негативно сказывается на биологической ценности напитков. Получение и дальнейшее использование белкового концентрата на предприятиях с небольшими объемами производства, процент которых в Украине значителен, нерационально, поскольку затраты превышают доходы от полученной продукции.

Учитывая вышеизложенное и то, что сегодня в рационе питания людей наблюдается дефицит белков, в частности, животного происхождения, интерес представляют исследования, направленные на получение продукта, содержащего все ценные компоненты творожной сыворотки и при этом обладающего максимально привлекательными сенсорными свойствами.

В указанном направлении при усовершенствовании технологии напитков из цельной творожной сыворотки внимания заслуживают нетрадиционные для молочной промышленности электрофизические методы обработки сырья, обладающие диспергирующим эффектом и способствующие ресурсо- и энергосбережению. Последнее является немаловажным критерием, учитывая низкую рентабельность сывороточных напитков. Перспективным направлением развития способов обработки творожной сыворотки является воздействие на дисперсную систему, основанное на импульсном электрическом пробое жидкости [1–7].

Диспергирующее действие электрогидравлического эффекта (ЭГ-эффект) было изучено еще в 50-е годы прошлого века Львом Юткиным и развито в работах многих исследователей [2–4].

ЭГ-эффект снижал практическое применение преимущественно в горнодобывающей, обогатительной и химической промышленности. Однако существует ряд научных разработок, доказывающих целесообразность использования данного эффекта с целью интенсификации производства и улучшения потребительских свойств продуктов при изготовлении сахара, крахмала, инулина, фруктозы и пр. [1, 5–8].

Предварительными исследованиями установлено, что обработка творожной

сыворотки электроискровыми разрядами приводит к уменьшению размера белковых частиц в 1,5–10,0 раз в зависимости от напряжения и количества импульсов [9], что позволяет получить сывороточный напиток без видимого белкового осадка.

Изучая динамику преобразований дисперсной фазы сыворотки под влиянием указанных параметров, наблюдали присутствие более крупных частиц в пробах, обработанных при напряжениях 20–30 кВ, и уменьшение их размеров по мере увеличения напряжения и количества импульсов. Поскольку полученные результаты свидетельствуют об улучшении качества напитков, особую значимость приобретает подбор оптимальных режимов обработки.

Цель работы – изучить действие электрических разрядов на белковую фазу творожной сыворотки и определить рациональные параметры электроискровой обработки.

## Материалы и методы

В качестве объекта исследований был выбран новый способ обработки творожной сыворотки электроискровыми разрядами (ЭИР) и математическая модель данного технологического процесса.

Предмет исследований – сыворотка творожная, обработанная электроискровыми разрядами (СТоЭИР), размеры частиц белков творожной сыворотки и параметры электроискровой обработки (напряжение, количество импульсов).

Электрогидравлическую обработку творожной сыворотки проводили на экспериментальной установке, состоящей из генератора импульсных токов ГИТ 50-5×1/4С УХЛ4 и электроразрядной камеры объемом 2700 см<sup>3</sup> литра, с электродной системой типа “острие-плоскость” [10, 11]. Напряжение при обработке изменяли в пределах 30–45 кВ, количество разрядов – от 5 до 25 с шагом 5.

Размеры белковой фазы определяли с помощью комплексной системы анализа частиц Malvern Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd., Великобритания) с углом детектирования 173°. Для контроля повторяемости результатов на каждом образце было выполнено не менее пяти повторных измерений. Распределения по размерам в единицах интенсивности были получены из анализа корреляционных функций с использованием алгоритма General purpose программного обеспечения анализатора Zetasizer Software 6.20.

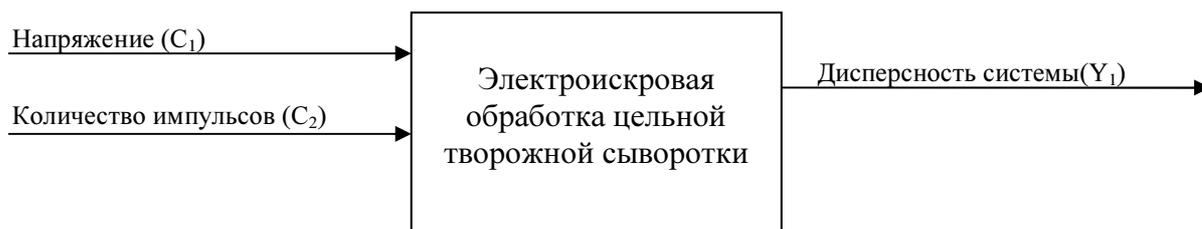
Для определения рациональных режимов электроискровой обработки сыворотки применен полнофакторный эксперимент (ПФЭ).

Подобраны комплексные показатели, которые в наибольшей степени характеризуют влияние обработки на качество готового продукта (рис. 1).

Предварительными исследованиями установлено, что температура процесса не имела существенного влияния на степень диспергирования частиц. С точки зрения

технологичности и во избежание излишних энергозатрат электроискровую обработку творожной сыворотки в технологии сывороточных напитков предусмотрено проводить при температуре промежуточного хранения ( $4\pm 2$ ) °С или сразу после осаждения белка и отделения сыворотки от творога – при температуре ( $30\pm 2$ ) °С.

В качестве параметров оптимизации выбраны напряжение и количество разрядов (импульсов).



**Рис. 1.** Параметрическая схема процесса моделирования электроискровой обработки цельной творожной сыворотки

**Fig.1.** A parametric scheme of a modeling process for curd whey electric spark processing

На основе априорной информации для параметров оптимизации определяли нулевой уровень факторов и интервал их варьирования, лежащий за пределами погрешности измерений. Так, для фактора напряжения ( $C_1$ , кВ), был избран верхний уровень  $C_{1max}=45$ , нижний уровень  $C_{1min}=30$ ; для фактора количества разрядов  $C_2$  – верхний уровень  $C_{2max}=25$ , нижний уровень  $C_{2min}=5$ .

В качестве исходных функций определяли зависимости показателя дисперсности системы  $Y_1$ , нм, от выше приведенных факторов.

### Результаты и их обсуждение

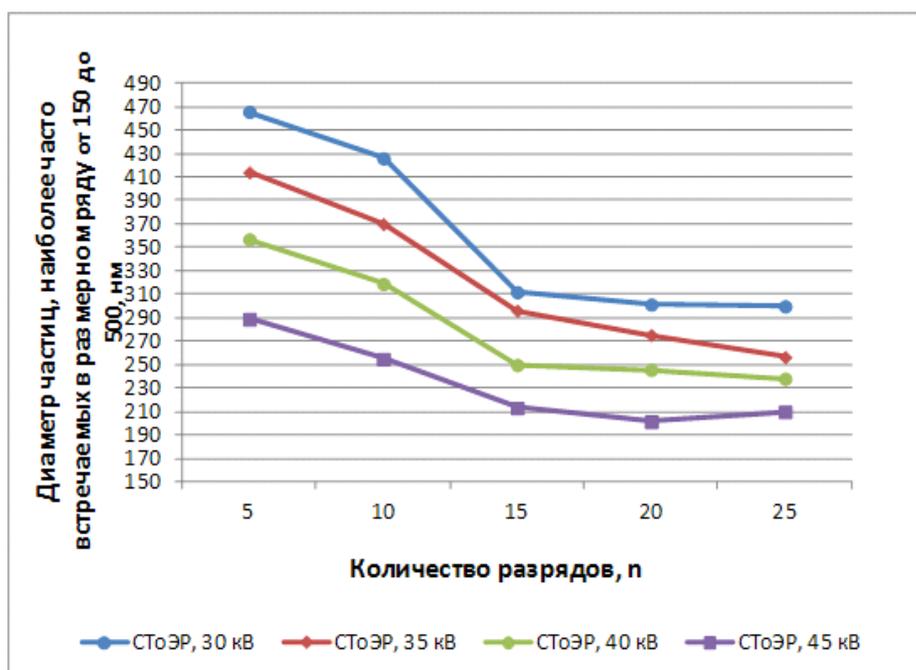
Анализ полученных данных показал, что кривые объемного распределения белковых частиц в творожной сыворотке после обработки электроискровыми разрядами с варьируемыми параметрами имели, как правило, несколько пиков. Поэтому для создания массива данных для математического моделирования изучаемого процесса использовали показатель, который указывает на наиболее часто встречающийся в популяции частиц размер. Результаты исследований представлены на рисунке 2.

В исходной сыворотке размер белковых частиц находился преимущественно в диапазоне свыше 300 нм, их объем составлял 89 %. Причем

наиболее встречающимися были частицы диаметром около 2000 нм, что соответствует справочным данным для частиц осажденного белка [4].

Как видно из рисунка 2, вследствие электроискровой обработки наблюдалось уменьшение размера белковых частиц и смещение пиков в диапазон размеров до 300 нм. Подтверждена ранее установленная зависимость размера белковых частиц от напряжения и количества разрядов. Наилучшие результаты были достигнуты при напряжении 45 кВ и количестве импульсов 20. При указанных режимах система приближалась к монодисперсной, количество частиц с размером свыше 300 нм стремилось к 0.

В результате реализации процесса диспергирования частиц получена исходная табличная функция  $f(x, y)$ , описывающая зависимость размеров частиц белков сыворотки творожной от параметров электроискровой обработки (напряжение, количество импульсов). В среде математического пакета MathCad с помощью комбинации встроенных функций *regress*, *interp* и специальной программы получен аналитический вид приближающей функции  $p(x, y)$  для исходной таблично заданной  $f(x, y)$  [5, 6]. Аналитический вид математической обработки представлен на рисунке 3.



**Рис. 2.** Зависимость размера частиц белка от напряжения и количества разрядов электроискровой обработки в размерном ряду от 150 до 500 нм  
**Fig. 2.** Relationship between protein particle size and discharge quantity of electric spark processing in size ranging from 150 to 500 nm

	0	1
0	1	3
1	0	4
2	0	3
3	0	2
4	1	2
5	2	2
6	0	1
7	1	1
8	2	1
9	3	1
10	0	0
11	1	0
12	2	0
13	3	0
14	4	0

I =

	0
0	-0.00470933
1	-0.00313434
2	0.5563904
3	-35.36966381
4	0.42044571
5	0.00365714
6	955.92199529
7	-11.30348952
8	-0.29350857
9	0.000608
10	-8945.66499688
11	79.71680952
12	5.82292857
13	-0.02496667
14	0.00008

coeffs =

**Рис. 3.** Аналитический вид фрагмента математического пакета MathCad  
**Fig. 3.** Analytical view of a portion of the MathCad mathematical package

$$p(x,y) := \sum_{i=0}^{\text{last}(\text{coeffs})} \left( \text{coeffs}_i \cdot x^{I_{i,0}} \cdot y^{I_{i,1}} \right)$$

С целью достижения наименьшего отклонения между значениями исходной  $f(x, y)$  и приближающей  $p(x, y)$  функций расчет полиномиальной регрессии осуществляли полиномом 4-го порядка.

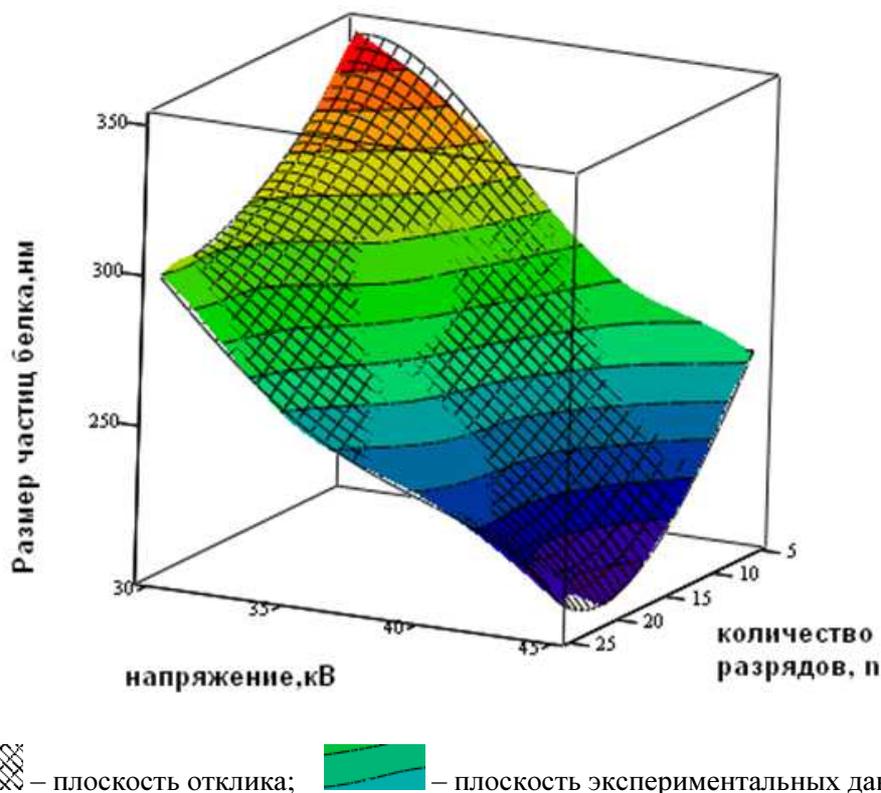
$$p(x, y) = -4.70933333 \cdot 10^{-3} \cdot x \cdot y^3 - 3.13433598 \cdot 10^{-3} \cdot y^4 + 0.5563904 \cdot y^3 - 35.36966381 \cdot y^2 + 0.42044571 \cdot \delta \cdot \delta^2 + 3.65714286 \cdot 10^{-3} \cdot \delta^2 \cdot y^2 + 955.92199529 \cdot y - 11.30348952 \cdot x \cdot y - 0.29350857 \cdot x^2 \cdot y + 6.08 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 \cdot y - 8.945665 \cdot 10^3 + 79.71680952 \cdot x + 5.82292857 \cdot x^2 - 0.02496667 \cdot x^3 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot x^4$$

С помощью этой модели были определены оптимальные параметры технологического режима обработки электроискровыми разрядами. Полученное уравнение имеет практическое значение и позволяет спрогнозировать качество полученного обработанного продукта.

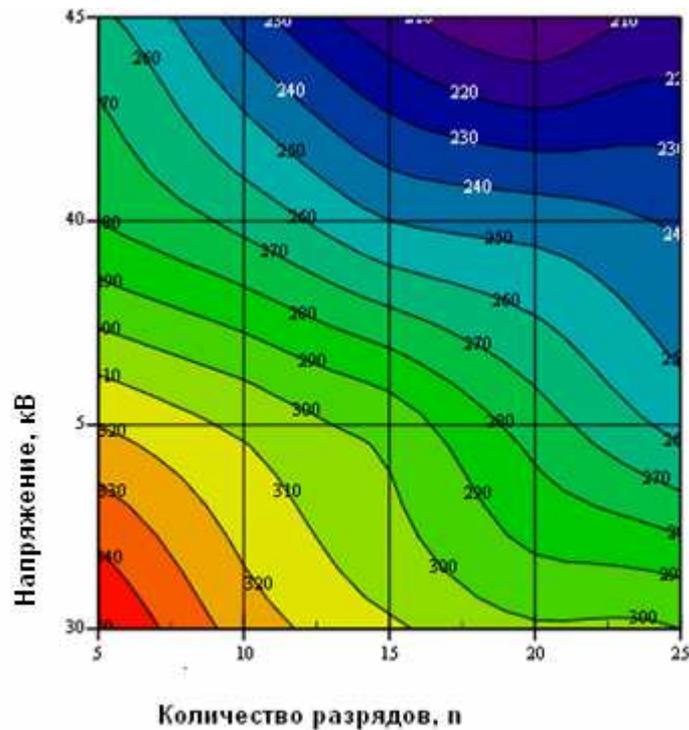
В среде MathCad выполнены графические изображения исходной функции  $f(x, y)$  и полученной аппроксимирующей функции  $p(x, y)$  (рис. 4). Следует отметить, что плоскость экспериментальных данных достаточно точно аппроксимируется плоскостью отклика, при этом погрешность не превышает  $\epsilon=1,925$ .

Уравнение регрессии, описывающее процесс диспергирования частиц по переменным параметрам, для продукта, обработанного электроискровыми разрядами, имеет следующий вид:

С помощью математического пакета MathCad на основе полученных экспериментальных данных построено графическое изображение линий уровня, которое позволило найти оптимальное значение параметров процесса обработки сыворотки творожной электроискровыми разрядами (рис. 5). Оптимальными являются: напряжение 45 кВ и количество разрядов 20, так как средний размер частиц белка уменьшается до 210 нм. Эти результаты согласуются с полученными результатами предыдущих экспериментальных исследований.



**Рис. 4.** Графическое изображение плоскостей отклика и экспериментальных данных процесса электроискровой обработки сыворотки в зависимости от напряжения и количества разрядов  
**Fig. 4.** Graphical presentation of response plane and experimental data for electric spark processing of whey subject to voltage and discharge quantity



**Рис. 5.** Графическое изображение линий уровня экспериментальных данных процесса обработки сыворотки творожной электроискровыми разрядами  
**Fig. 5.** Graphical presentation of the level lines of experimental data for curd whey processing with electric spark discharge

В результате повторных исследований установлено, что именно подобранные параметры обработки электроискровыми разрядами обеспечивают степень дисперсности для замедления образования белкового осадка в напитках из цельной творожной сыворотки.

#### Выводы

1. В сыворотке творожной, обработанной электроискровыми разрядами, доля белковых частиц размером свыше 300 нм уменьшается в зависимости от напряжения и количества разрядов.
2. Рациональными параметрами электроискровой обработки в технологии сывороточных напитков являются: напряжение 45 кВ и количество импульсов 20, что обеспечивает дисперсность системы, достаточную для замедления процесса осаждения белковых частиц.
3. Подтверждена целесообразность применения электроискровой обработки в технологии напитков из цельной творожной сыворотки с целью получения продукта с улучшенными органолептическими показателями без видимого белкового осадка.

#### Литература

1. Кочубей-Литвиненко О. В., Чернюшок О. А., Васылив В. П., Маринин А. И. Инновационный способ обработки творожной сыворотки // Инновационные технологии в пищевой промышленности. Материалы XII Межд. н.-практ. конф. Минск, 2013. С. 54–57.
2. Кочубей-Литвиненко О. В., Чернюшок О. А. Обработка творожной сыворотки электроискровыми разрядами // Молочная промышленность. 2013. № 11. С. 58–59.
3. Патент України №22033. Установка для електроіскрового оброблення рідких середовищ / А.І. Маринін, Ю. О. Дашковський, А. І. Українець, В. П. Василів, В. В. Олішевський. Опубл. 10.04.07. Бюл. № 4.
4. Храмов А. Г. Феномен молочной сыворотки. СПб.: Профессия, 2011. 804 с.
5. Плис А. И., Сливина Н. А. Mathcad: математический практикум для экономистов и инженеров: Учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 1999. 656 с.
6. Гурский Д. А. Вычисления в MathCad. Минск, ООО Новое знание, 2003. 814 с.

Pateikta spaudai 2014-02

### Summary

The results of the research on protein particles sizes in curd whey processed with electric spark discharges under variable parameters – voltage and discharge quantity are presented. The whey was processed with the laboratory electric hydraulic unit with voltage ranging from 30 to 45 kV and discharge quantity at a pitch of 5.

The sizes of protein phase particles were determined by means of a complex system of the particles analysis at Zetasizer Nano ZS (Great Britain) analyzer.

As a result of electrical spark processing, the decrease in the protein particles sizes and peak shift in the size range of 300 nm were observed. The earlier determined dependence of the protein particles sizes on voltage and discharge quantity was confirmed. The best results were achieved at 45 kV voltage and 20 and 25 discharge quantity. With the mentioned conditions the system became monodisperse and the particles quantity with the size of more than 300 nm approximated to zero.

In accordance with the basic optimization principles, a parametric scheme of the curd whey processing with electric spark discharges was prepared, the ingoing (voltage, discharge quantity) and outgoing factors (disperse system) were determined, and the optimization criterion was proved.

The mathematical modeling describing the dependence of the protein particles sizes on the main parameters of innovative processing method, i.e. voltage and discharge quantity was prepared in the mathematical software MathCad.

The initial table function  $f(x, y)$  describing the dependence of curd whey protein particles size on electric spark processing factors (voltage and impulse quantity) was derived as a result of the particle dispersion process. Analytical form of approximate  $p(x, y)$  for initial table function  $f(x, y)$  was prepared using a combination of built-in functions such as *regress*, *interp* and special program in the MathCad software.

Based on the full factorial experiment, a rational regime for electric spark whey processing with 45 kV voltage and 20 discharge quantity was selected. It provides a system dispersion sufficient for the deceleration of protein particles settling in whey drinks.

**Keywords:** optimization, parameter, curd whey, electric spark discharges, protein particles sizes, mathematical modeling.

### Santrauka

Pateikti varškės išrūgų baltyminės fazės dalelių tyrimo rezultatai. Varškės išrūgos apdorotos elektrokibirkštiniu metodu, keičiant pagrindinius jo parametrus – įtampą ir išlydžių kiekį. Išrūgos tirtos elektrohidrauliniu įrenginiu, taikant 30–45 kV įtampą, kai išlydžių kiekis, esant jų intervalui 5, svyravo nuo 5 iki 25. Kontroliniai pavyzdžiai ruošti iš neapdorotų varškės išrūgų.

Baltymų fazės dalelių dydis nustatytas taikant kompleksinę analitinę metodologiją Zetasizer Nano ZS (Anglija) analizatoriumi.

Dėl elektrokibirkštinio apdorojimo sumažėjo baltymų dalelių dydis, pastarajam pakitus iki 500 nm. Baltymų dalelių dydis priklausė nuo įtampos ir kibirkščių kiekio. Geriausi rezultatai pasiekti esant 45 kV įtampai, panaudojus 20 ir 25 impulsus. Esant šiam režimui, sistema tapo monodispersine, ir nebeliko didesnių nei 300 nm dalelių.

Buvo optimizuota varškės išrūgų sistema taikant elektrokibirkštinių apdorojimą. Nustatytas išlydžių kiekis ir įtampa bei sistemos dispersiškumo priklausomybė nuo jų. Apskaičiuotas optimizacijos kriterijus.

Panaudojus matematinį paketą MathCad gautas modelis, atspindintis baltymų dalelių dydžio priklausomybę nuo pagrindinių apdorojimo parametrų – įtampos ir išlydžių kiekio.

Realizavus dalelių dispergavimo procesą, gauta funkcija  $f(x, y)$ , charakterizuojanti varškės išrūgų baltymų dalelių dydžio priklausomybę nuo elektrokibirkštinio apdorojimo parametrų (įtampa, impulsų kiekis). Panaudojus matematinį paketą MathCad ir įvertinus funkcijų *regress*, *interp* kombinaciją specialiomis funkcijomis, gauta analitinė funkcijos  $p(x, y)$  išraiška, naudotina pradinei  $f(x, y)$  surasti.

Ekspérimentu nustatytas racionalus elektrokibirkštinis išrūgų apdorojimo režimas panaudojant 45 kV įtampą ir 20 išlydžių. Jį taikant, sulėtėja išrūgų baltymų dalelių sedimentacijos procesas iki tokių parametrų, kurie pageidaujami gaminant išrūgų gėrimus.

**Raktažodžiai:** optimizacija, parametrai, varškės išrūgos, elektrokibirkštiniai išlydžiai, baltymų dalelių dydis, matematinis modeliavimas.