

**И. Ю. Ухарцева** (ukhartseva@yandex.ru),  
кандидат технических наук, доцент  
Белорусского торгово-экономического  
университета потребительской кооперации

**Е. А. Цветкова** (tsvetkova@tut.by),  
кандидат технических наук, доцент  
Гомельского государственного  
университета имени Ф. Скорины

**Ж. В. Кадолич** (cilodak@mail.ru),  
кандидат технических наук, доцент  
Белорусского торгово-экономического  
университета потребительской кооперации

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Проиллюстрирована возможность использования метода изотермической деполяризации для исследования жидких дисперсных систем, моделирующих пищевые продукты. Приведен принцип действия анализатора дисперсных систем и представлены результаты экспериментального изучения поляризационно-деполяризационных процессов в дисперсных системах различного состава.

The article illustrates the possibility of using the method of isothermal depolarization for the exploration of liquid disperse systems simulating foods. The operating principle of disperse systems analyzer and the results of experimental study of polarization-depolarization processes in dispersed systems of various compositions are represented.

**Ключевые слова:** изотермическая деполяризация; дисперсные системы; поляризационный заряд; время релаксации.

**Key words:** isothermal depolarization; dispersions; polarization charge; relaxation time.

### Введение

*Материальная основа современной цивилизации и самого существования человека связана с дисперсными системами. Дисперсными являются все объекты живой природы, воздух, многие пищевые продукты и продукты их переработки. В основе производства пищевых продуктов: бульонов, мороженого, различных кондитерских изделий, молочных продуктов, а также в основе хлебопечения, виноделия, пивоварения лежат такие коллоидно-химические процессы, как набухание, растворение, студнеобразование, агрегация, коагуляция, осаждение, пептизация, адсорбция и др. Для изучения структуры и свойств таких систем применяют различные методы исследования [1]. Одним из перспективных методов является электрофизический метод – метод изотермической деполяризации.*

Электрофизические методы исследования зарекомендовали себя как удобные и информативные методы контроля структуры и свойств дисперсных систем [2]. Экспериментально и теоретически показано [3], что они дают существенно больший объем информации, чем традиционные, имеют широкую область применения, поддаются автоматизации и легко встраиваются в современные информационно-вычислительные комплексы.

Исследования проводили с помощью анализатора дисперсных систем АДС-1, который представляет собой компьютеризированный программно-аппаратный комплекс.

Технические характеристики АДС-1 позволяют реализовать различные виды электрических измерений, используемых при изучении состава и свойств вещества. Для регистрации электрического отклика на физико-химические процессы использован метод изотермической деполяризации (ИТД), обладающий большой информативностью и применяемый для контроля жидких дисперсных систем. В соответствии с моделью аддитивности вкладов дифференциальных поляризационных механизмов получали интегральный результат.

Согласно методике комплексных электрофизических исследований [3], которую применяет АДС-1, используют следующие параметры: удельную электрическую проводимость  $\chi$ , изменение ее во времени  $\chi(t)$ , скорость изменения электропроводности  $\partial\chi/\partial t$ , зависимость  $\chi$  от амплитуды переменного тока  $\chi(A)$  и от частоты  $\chi(\omega)$ , эквивалентную (приведенную) электропроводность  $\lambda = \chi/c$  и зависимость ее от концентрации  $\lambda(c)$ ; ток деполяризации  $I(t)$ , логарифм тока деполяризации  $\ln I(t)$ , полный дипольный момент единицы объема  $P = \int_0^{\infty} I(t)dt$ , эффективное время релаксации  $\tau$ , фактор деполяризации  $F$  (величина, коррелирующая с вязкостью системы,  $1/F \sim \eta$ ), первая производная тока деполяризации  $\partial I(t)/\partial t$ ; тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , зависимость  $\text{tg}\delta$  ( $\omega$ ) от частоты,  $\partial \text{tg}\delta$  ( $\omega$ )/ $\partial t$ .

Принцип метода измерения токов ИТД представлен на рисунке 1.

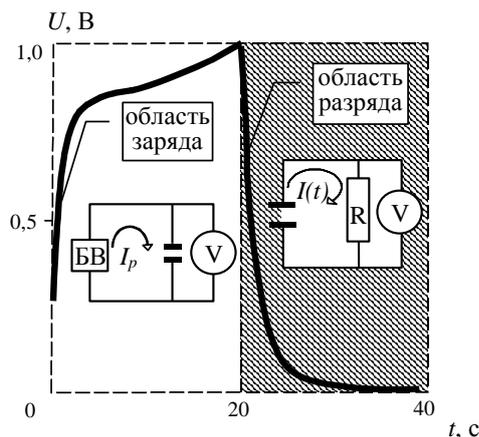


Рисунок 1 – Принцип метода измерения поляризационных процессов в дисперсных системах

Полная кривая процесса поляризации системы состоит из двух областей: заряда и разряда. Область заряда показывает изменение напряжения на электродах ячейки в течение времени поляризации  $t$  при прохождении постоянного тока поляризации  $I_p$  от источника постоянного тока. В области разряда регистрируется ток деполяризации  $I(t)$ , а также время релаксации  $\tau$  поляризационного заряда. При этом поляризованность системы, содержащей релаксирующие частицы, можно описать выражением [4]:

$$P = P_0 e^{-t/\tau}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – стационарное (установившееся) значение поляризации объекта;  
 $t$  – время протекания поляризации;  
 $\tau$  – время релаксации поляризационного заряда.

Ток деполяризации такой системы:

$$I(t) = \frac{dP}{dt} = -\frac{P_0}{\tau} e^{-t/\tau} = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

где  $I_0$  – начальное значение тока.

Логарифмируя выражение (2), получаем уравнение (3), позволяющее определить время релаксации  $\tau$  как котангенс угла наклона  $\ln I(t)$  к оси абсцисс:

$$\ln I(t) = \ln I_0 - t/\tau. \quad (3)$$

Полный поляризационный заряд системы в момент времени  $t_1$  равен

$$P \left( \int_{t_1}^{\infty} I(t)dt \right) = - \int_{t_1}^{\infty} \frac{P_0}{\tau} e^{-t/\tau} dt = P_0 \left( e^{-t_1/\tau} - e^{-\infty/\tau} \right). \quad (4)$$

Если в единице объема исследуемого вещества находится  $n$  поляризующихся частиц, то поляризованность пробы объемом  $V$  составит:

$$P = npV, \quad (5)$$

где  $p$  – дипольный момент частицы.

Выражения (1)–(3) описывают действие в исследуемой системе одного механизма деполяризации. Такой механизм характерен для дисперсных систем, содержащих в своем составе лишь один диспергированный компонент и не содержащих каких-либо других веществ – стабилизаторов на основе ПАВ и т. п.

В реальных дисперсных системах обычно действует одновременно несколько поляризационных механизмов. Результирующее электрическое поле «короткоживущего электрета», полученного в результате внешней поляризации, определяется суммированием локальных электрических полей всех поляризационных подсистем.

Вместо (1) и (2) имеем:

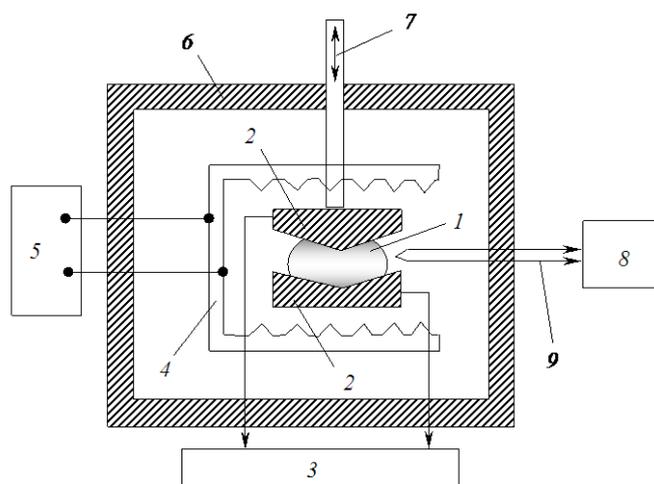
$$P = \sum_{i=1}^n P_{0i} e^{-t/\tau_i}; \quad (7)$$

$$I = \sum_{i=1}^n I_{0i} e^{-t/\tau_i}. \quad (8)$$

Экспериментально показано, что дисперсные системы с выраженной гелевой структурой имеют на логарифмической кривой деполяризации несколько отчетливо выраженных линейных участков [5; 6]. Это означает, что в общем процессе релаксационного разряда электрически поляризованной системы в отдельные интервалы времени преобладает релаксация зарядов, локализованных на определенного типа частицах. Выражения (7) и (8) представляют собой совокупности компонентов, изменяющихся во времени с разной скоростью.

Выражение (7) графически представляется в виде ломанной линии, изгибы, прямолинейные участки, углы наклона которой соответствуют поляризации компонентов дисперсной системы.

Схема измерительной установки прибора представлена на рисунке 2.



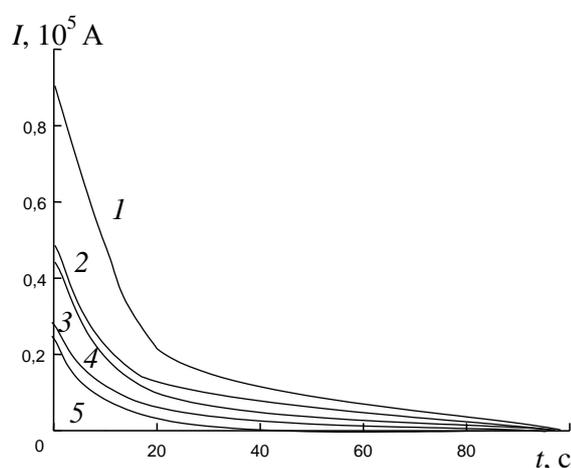
Условные обозначения:

- 1 – исследуемый образец; 2 – электроды; 3 – АДС-1; 4 – нагреватель;  
 5 – источник питания для нагревателя; 6 – термостабилизирующая измерительная камера;  
 7 – микрометрический винт; 8 – вольтметр; 9 – термопара.

Рисунок 2 – Блок-схема экспериментальной установки для проведения изотермической деполяризации

В качестве дисперсных систем, моделирующих пищевые продукты, использовали полимерные гели поливинилового спирта (ПВС), наполненные соединениями различной природы (желатин, крахмал, папаин, карбоксиметилцеллюлоза и Na-карбоксиметилцеллюлоза). Такие системы содержат дисперсные компоненты, которые по-разному ведут себя в электрическом поле: происходит ориентация дипольных молекул, разнополярно заряженных частиц и надмолекулярных образований, квазидиполей, перемещение на макрорасстояния физических носителей заряда. В результате в образце появляется асимметрия в распределении заряженных частиц и он поляризуется. После снятия поляризующего поля исследуемый образец релаксирует к первоначальному равновесному состоянию, отдавая накопленную энергию. В течение времени релаксации поляризационного заряда по внешней электрической цепи течет ток деполяризации, сила и кинетика снижения которого полностью определяются составом и структурой дисперсной системы. Существование тока деполяризации означает сохранение в течение некоторого времени поляризованного состояния дисперсной системы и соответствует проявлению ею электретного эффекта [7; 8].

Из анализа кинетических зависимостей деполяризации гелей ПВС, наполненных Na-карбоксиметилцеллюлозой (Na-КМЦ), желатином и папаином, установлены закономерности релаксации поляризационного заряда (рисунок 3). Кривые деполяризации характеризуются наличием прямолинейных участков и перегибов, соответствующих компонентному составу и структуре гелевой системы. Появление перегибов на кривых предполагает возникновение дополнительного механизма деполяризации, который обусловлен физико-химическим взаимодействием компонентов.



Условные обозначения:

1 – папаин, 2 – карбоксиметилцеллюлоза; 3 – желатин; 4 – Na-карбоксиметилцеллюлоза; 5 – крахмал.

Рисунок 3 – Кинетика спада заряда ИТД в наполненных (5 %) гелях ПВС в зависимости от вида наполнителя

Сопоставление электретных характеристик гелевых систем с различными наполнителями при одинаковом их содержании показало, что наполнение геля папаином обеспечивает максимальное значение поляризационного заряда и достаточно большое время релаксации. Например, при 5%-ном наполнении папаином дипольный момент единицы объема равен  $0,614 \cdot 10^{-5}$  Кл·м, тогда как для желатина  $0,328 \cdot 10^{-5}$  Кл·м, а для Na-КМЦ –  $0,220 \cdot 10^{-5}$  Кл·м.

Сравнение полных зарядов деполяризации наполненных гелей ПВС показало, что использование в качестве наполнителей папаина и желатина приводит к росту поляризуемости систем. Для систем с папаином наблюдается экспоненциальное насыщение заряда при увеличении концентрации наполнителя до 2%. При введении желатина заряд экспоненциально увеличивается с насыщением при 25%. Наполнение гелей Na-КМЦ вызывает снижение заряда деполяризации, при этом электропроводность исследуемой системы нестабильна.

Полученные данные свидетельствуют о влиянии состава дисперсной системы на ее поляризационные характеристики, что позволяет регулировать анизотропию ее свойств в широких пределах.

## Заклучение

Существование индивидуальных механизмов поляризации-деполяризации в модельных жидких дисперсных системах отражается на кинетике спада заряда ИТД и релаксационных характеристиках. Тем самым, комплекс электрофизических свойств может служить одним из идентификационных признаков ряда пищевых продуктов жидкой консистенции, рассматриваемых в качестве дисперсных систем. Проведенные исследования показывают возможность использования метода изотермической деполяризации в пищевой промышленности и биотехнологии для контроля качества продукции по электрофизическим свойствам.

## Список использованной литературы

1. Ухарцева, И. Ю. Методы и средства исследования : курс лекций / И. Ю. Ухарцева, Е. А. Цветкова. – Гомель : Бел. торгово-экон. ун-т потребит. кооп., 2013. – 212 с.
2. Sessler, Ed. G. M. Electrets / Ed. G. M. Sessler. – Berlin : Springer – Verlag, 1987. – 4553 p.
3. **О поляризационных** свойствах некоторых модельных систем / И. В. Шаламов [и др.] // Технология и проблемы экологии строительства глубоких скважин в Белоруссии : сб. научных трудов БелНИГРИ. – Минск, 1996. – С. 53–65.
4. Программно-аппаратный комплекс АИР-1 для контроля жидкодисперсных систем / И. В. Шаламов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 6. – С. 143–144.
5. Ухарцева, И. Ю. Поляризационные характеристики наполненных гелей на основе поливинилового спирта / И. Ю. Ухарцева, И. В. Шаламов, Е. А. Цветкова // Пластические массы. – 1998. – № 6. – С. 40–42.
6. Ukhartseva, I. Filled gels on water – soluble polymer / I. Ukhartseva, E. Tsvetkova // 7-th European Polymer Federation Symposium on Polymeric Materials, Szczecin, Poland, September 20–24. – Szczecin, 1998. – P. 115.
7. Гольдаде, В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук ; под ред. Н. К. Мышкина. – Минск : Бел. наука, 2009. – 657 с.
8. Kestelman, N. Electrets in Engineering: Fundamentals and Applications / N. Kestelman, L. Pinchuk, V. Goldade. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2000. – 281 p.

*Получено 17.02.2016 г.*