

---

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

---

Н.И. Лебовка, М.П. Купчик\*, М.И. Бажал\*, В.М. Фалес\*, Р.А. Серебряков\*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРООБРАБОТКИ СОКОСТРУЖЕЧНОЙ СМЕСИ

*Институт биокolloидной химии НАН Украины,  
ул. Вернадского, 42, Киев-142, 03142, Украина*

*\*Украинский государственный университет пищевых технологий,  
ул. Владимирская, 68, Киев-33, 01033, Украина*

Перспективным направлением повышения эффективности процессов извлечения ценных компонентов из растительного сырья является разработка и использование новых электрофизических методов обработки растительной ткани, к которым относятся способы, основанные на использовании импульсных электрических полей.

Для разработки технологии предварительной электрообработки сокоотружечной смеси и установления оптимальных параметров процесса в системе свекловичная стружка – сок необходимо проведение математического моделирования процесса влияния электрических полей на эффективную электропроводность подобных гетерогенных смесей и их омический нагрев.

Систему свекловичная стружка – сок возможно рассматривать как гетерогенную смесь, которая состоит из двух компонентов с большой (сок) и малой (частицы) электропроводностями. Обозначим объемную концентрацию частиц в сокоотружечной смеси как  $\phi$ . При этом  $\phi=0$  соответствует чистому соку, а большие значения  $\phi \rightarrow 1$  соответствуют частицам растительного сырья без сока (рис. 1).

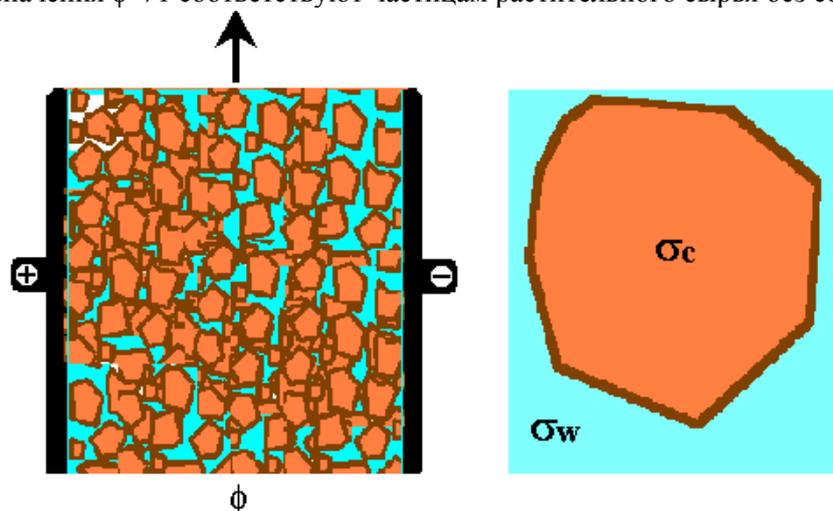


Рис. 1. Сокоотружечная смесь во внешнем электрическом поле. Здесь  $\phi$  соответствует объемной концентрации стружки в сокоотружечной смеси  $\sigma_w$ ,  $\sigma_s$  – электропроводности сока и стружки,  $\sigma_w \approx 1 \text{ См/м}$ ,  $\sigma_s \approx 10^{-2} \text{ См/м}$ . Стрелка указывает на динамический характер процесса электрообработки.

В настоящее время поведение эффективной электропроводности гетерогенных сред  $\sigma_{ef}$  в зависимости от  $\phi$  достаточно изучено. Известно, что величина  $\sigma_{ef}$  существенно зависит от  $\phi$  только в некотором интервале значений  $\phi < \phi_c$ , а при  $\phi > \phi_c$  она мало отличается от электропроводности составляющей с малой электропроводностью (в нашем случае частиц сырья). Точка  $\phi_c$  отвечает точке перколяции и особенности проявления этой точки зависят от структуры гетерогенной системы, анизотропии ее свойств, формы частиц и т.д.

Для описания электропроводности этой гетерогенной системы использовали обобщенное уравнение эффективной среды, предложенное в [1] и позволяющее учитывать особенности поведения вблизи точки перколяции  $\phi = \phi_c$ :

$$\frac{\varepsilon(1-\Sigma)}{1+\lambda\Sigma} + \frac{\Sigma_0 - \Sigma}{\Sigma_0 + \lambda\Sigma} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\Sigma = \Sigma_{ef}/\Sigma_w$ ,  $\Sigma_0 = \Sigma_s/\Sigma_w$ ,  $\varepsilon = (1-\phi)/\phi$ ,  $\lambda = \phi_c/(1-\phi_c)$ ,  $\Sigma_{ef} = \sigma_{ef}^{1/t}$ ,  $\Sigma_w = \sigma_w^{1/t}$ ,  $\Sigma_s = \sigma_s^{1/t}$ ,  $\sigma_{ef}$ ,  $\sigma_w$ ,  $\sigma_s$  – электропроводности эффективной среды, сока и частиц, а  $t$  – скейлинговый показатель в перколяционном уравнении:

$$\sigma_{ef} \propto (\phi_c - \phi)^t. \quad (2)$$

Впредь мы будем принимать значение показателя  $t = 2,3$  [2], характерное для трехмерных систем, хотя в общем случае величина  $t$  должна определяться как подгоночный параметр. При  $t = 1$  уравнение (1) сводится к симметричному уравнению типа Бруггемана [3].

Уравнение (1) является квадратным уравнением относительно неизвестного  $\Sigma$  и его решение возможно представить в виде

$$\Sigma = \left( \frac{\varepsilon(\lambda - \Sigma_0) + \Sigma_0\lambda - 1 + \sqrt{\varepsilon^2(\lambda + \Sigma_0)^2 + 2\varepsilon[\Sigma_0(\lambda + 1)^2 - \lambda(\Sigma_0 - 1)^2] + (\lambda\Sigma_0 + 1)^2}}{2\varepsilon(\lambda + 1)} \right). \quad (3)$$

При  $\phi_c \rightarrow 1$  это уравнение упрощается до линейного уравнения типа:

$$\Sigma = 1 - \phi(1 - \Sigma_0). \quad (4)$$

При  $\Sigma_0 = 0$  уравнение (4) упрощается до перколяционного уравнения типа

$$\Sigma = 1 - \phi/\phi_c \text{ при } \phi < \phi_c, \quad (5)$$

$$\Sigma = 0 \text{ при } \phi \geq \phi_c.$$

Обобщенные зависимости  $\Sigma(\phi) = \Sigma_{ef}(\phi)/\Sigma_w$  построены при разных значениях  $\phi_c$  и  $\Sigma_0 = \Sigma_s/\Sigma_w$  представлены на рис. 2.

Для оценочных расчетов в системе растительная частица – сок использовали значение параметров, приведенных в таблице. Зависимость эффективной удельной электропроводности гетерогенной смеси свекловичная стружка – сок, рассчитанной при этих значениях параметров при помощи уравнения (3), приведена на рис. 3.

*Физико-химические и электрофизические свойства, характерные для гетерогенной смеси (свекловичная стружка-сок) для использования в оценочных расчетах*

Параметры	Значения
$t$ , скейлинговый показатель в перколяционном уравнении	2,3
$\phi_c$ , перколяционная объемная часть растительных частиц в смеси	$\approx 1$
$\sigma_w$ , электропроводность сока	$\approx 1$ См/м
$\sigma_s$ , электропроводность влажной свекловичной стружки	$\approx 10^{-1}$ См/м (может быть $10^{-3} - 10^{-1}$ См/м)
$\rho$ , плотность смеси свекловичная стружка-сок	$\approx 10^3$ кг/м <sup>3</sup> ( $1 - 1,3 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup> )
$C$ , теплоемкость смеси свекловичная стружка-сок	$\approx 3,5 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)

Среднее значение поля на частице сырья  $E_s$  зависит от  $\phi$  и отличается от внешнего поля  $E$ . Эту зависимость возможно оценить при помощи соотношения

$$j = E\sigma_{ef} = E_s\sigma_s, \quad (6)$$

то есть

$$E_s/E = \sigma_{ef}/\sigma_s. \quad (6')$$

Следует отметить, что формулы (6) могут использоваться только для приблизительной оценки поля на частице при не очень больших, или, наоборот, очень больших значениях  $\phi$ . При  $\phi \approx 0,5$  при

помощи формул (6) возможно оценить только среднее значение поля на частице, а в целом по системе возможны значительные флуктуации и отклонения от этого значения.

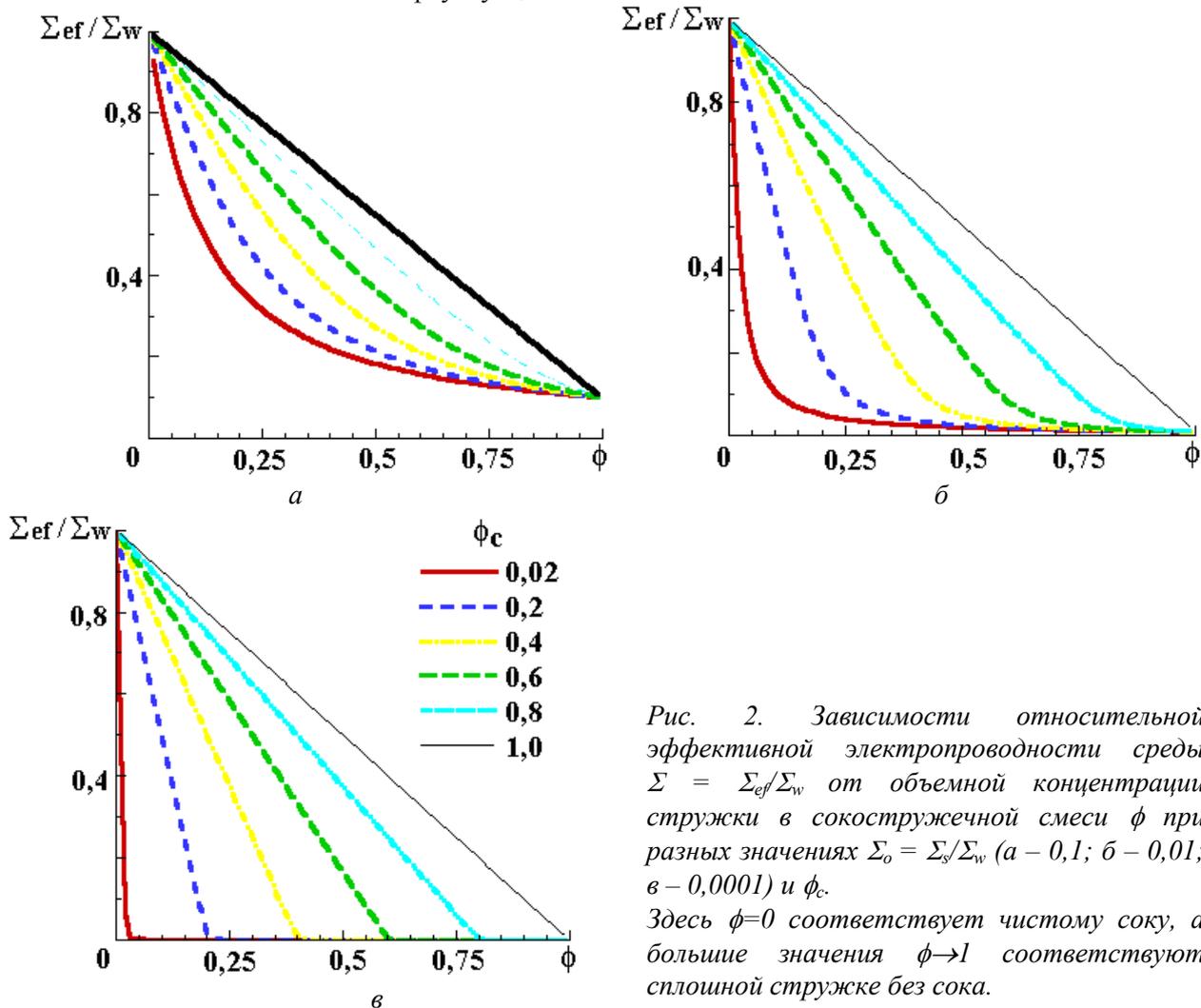


Рис. 2. Зависимости относительной эффективной электропроводности среды  $\Sigma = \Sigma_{ef}/\Sigma_w$  от объемной концентрации стружки в сокостружечной смеси  $\phi$  при разных значениях  $\Sigma_0 = \Sigma_s/\Sigma_w$  ( $a - 0,1$ ;  $б - 0,01$ ;  $в - 0,0001$ ) и  $\phi_c$ .  
Здесь  $\phi=0$  соответствует чистому соку, а большие значения  $\phi \rightarrow 1$  соответствуют сплошной стружке без сока.

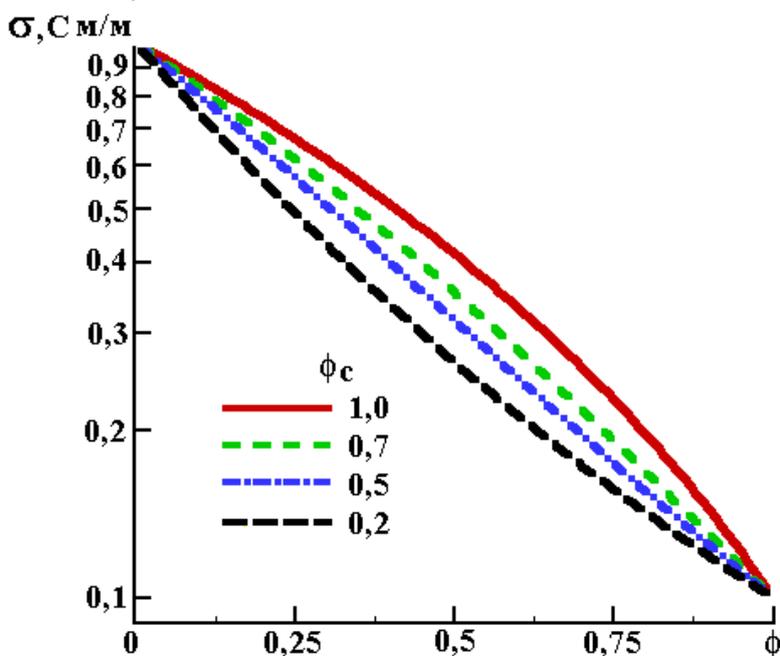


Рис. 3. Зависимость эффективной удельной электропроводности гетерогенной смеси (свекловичная стружка – сок) от объемной концентрации частиц  $\phi$  при различных значениях  $\phi_c$ .

Тепло, вырабатываемое током плотностью  $j$ , за единицу времени в объеме  $V$  равняется

$$Q = \int \frac{j^2}{\sigma(r)} dV = \int \sigma(r) E^2 dV \approx \sigma_{\text{ef}} E^2 V, \quad (7)$$

где  $\sigma(r)$  – удельная электропроводность среды, что в общем виде зависит от пространственной координаты  $r$ ,  $\sigma_{\text{ef}}$  – эффективная электропроводность среды;  $V$  – объем нагреваемого сырья.

При помощи этой формулы несложно показать, что при использовании электрических полей напряженностью  $E = 50\text{--}300$  В/см для свекловичного сырья его общая масса нагревается до температуры порядка  $100^\circ\text{C}$  за несколько минут. Детали теоретических и экспериментальных исследований процессов омического нагрева растительного сырья приведены в работах [4–6].

Нагрев растительного сырья до температуры порядка  $70\text{--}80^\circ\text{C}$ , как правило, приводит к разрушению мембран и нарушению целостности клеток (термоплазмолиз). При омическом нагреве распределение температур в середине биологической ткани может быть сильно неоднородным. Как следует из соотношения (7) при достаточно большой, но постоянной плотности тока наибольшее тепловыделение происходит в местах с минимальными значениями  $\sigma(r)$ . Процессы электроплазмолиза при значительной величине электрического поля могут привести к значительному омическому нагреву среды, что сопровождается большими расходами электроэнергии и вызывает нежелательную тепловую деструкцию растительного сырья. Поэтому реальное время электрообработки гетерогенной смеси всегда ограничено условием значительного термического перегрева.

Для количественной оценки эффектов омического нагрева оценим плотность тока, протекающего через гетерогенную смесь, соотношением

$$j = I/S = E\sigma_{\text{ef}}, \quad (8)$$

где  $I$  – величина тока;  $S$  – площадь поперечного сечения образца.

Скорость повышения температуры можно оценить при помощи соотношения:

$$V_T = \Delta T/\Delta t = Q/(C\rho V) = j^2/(C\rho\sigma_{\text{ef}}) = E^2\sigma_{\text{ef}}/(C\rho), \quad (9)$$

где  $Q$  – тепло, выделяющееся в объеме  $V$  нагреваемого материала.

При  $E = 100$  В/см и  $\sigma_{\text{ef}} = 10^{-1}$  См/м (сплошные частицы без сока) имеем  $j = 10^4$  А/м<sup>2</sup>. Для теплоемкости смеси частицы–сок использовали значение  $C = 3,4\text{--}3,6 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), что соответствует теплоемкости свекловичного сырья в интервале влажностей  $70\text{--}80\%$  [7]. При  $\rho \approx 10^3$  кг/м<sup>3</sup> имеем:

$$\Delta T/\Delta t = E^2\sigma_{\text{ef}}/(C\rho) = 3,0^\circ\text{C}/\text{с}. \quad (10)$$

Таким образом, в поле  $E = 100$  В/см температуру данного материала можно повысить на  $3,0^\circ\text{C}$  за 1 с.

Как следует из формулы (9), при электрообработке температура повышается линейно со временем. Экспериментальные исследования показывают возможность более быстрого увеличения температуры, происходящего в основном вследствие роста эффективной электропроводности среды при электрообработке. Однако такие эффекты могут проявляться только для сильно концентрированных сокоотружечных смесей при высоких значениях объемной концентрации стружки в системе частицы–сок при  $\phi \rightarrow 1$ , то есть фактически для частиц без сока.

На рис. 4 представлена зависимость скорости нагревания смеси частицы–сок от объемной концентрации стружки в смеси  $\phi$  при  $\phi_c = 1$  при различных значениях  $E$ . Мы видим, что даже при незначительных значениях  $E$  омический нагрев в данных системах очень значителен.

Зависимости рассчитаны при помощи уравнений (4), (10) и параметров, приведенных в таблице. Здесь величина  $\phi_p$  отвечает скорости роста температуры  $V_p = \Delta T/\Delta t = 30^\circ\text{C}$  за минуту.

Если выбрать некоторое критическое значение для скорости омического нагрева, которое нельзя превышать с позиции промышленного использования процесса, то можно определить предельно допустимую концентрацию смеси частицы–сок  $\phi_p$ , ниже которой омический нагрев приводит к недопустимым перегревам.

Таким образом, здесь мы имеем определенный критерий для выбора значений концентраций смеси частицы–сок  $\phi$ . Пример зависимости  $\phi_p$  от  $E$  для выбранного значения  $V_p = \Delta T/\Delta t = 30^\circ\text{C}/\text{мин}$  приведен на рис. 5.

Для электроразрушения гетерогенной системы необходимо использовать максимальное время электрообработки для максимально больших значений  $E$  и минимальных значений  $\phi$ . Наоборот для уменьшения вредного действия омического нагрева необходимо использовать минимальное время, минимальные значения  $E$  и не допустить снижения  $\phi$  ниже минимально допустимой концентрации  $\phi_p$  (см. формулы (4), (10)).

Постановка оптимизационной задачи предполагает выбор таких значений  $\phi$ ,  $E$  и  $t$ , при которых будет достигнута максимальная степень электроплазмолиза  $\theta(t, E_s(\phi))$  при нагревании смеси за время электрообработки не превышающего предельного  $\Delta T_{\max}$ . Как пример, допустим, что предельный перегрев не может превышать  $\Delta T_{\max}$ .

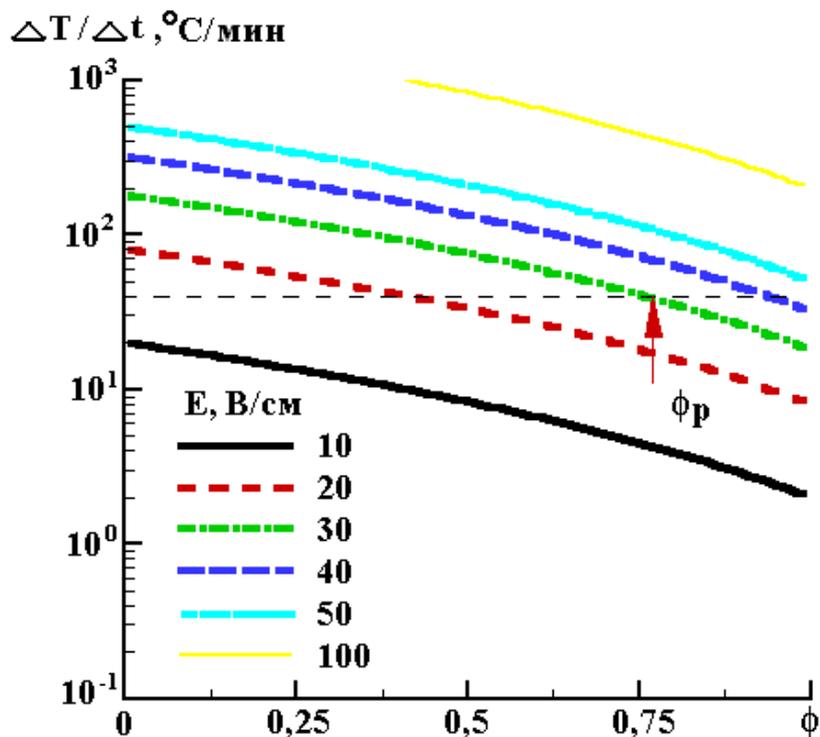


Рис. 4. Зависимость скорости нагревания смеси частицы – сок  $\Delta T/\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$  за минуту) от объемной концентрации частиц в смеси  $\phi$  при  $\phi_c = 1$  и различных значениях  $E$ .

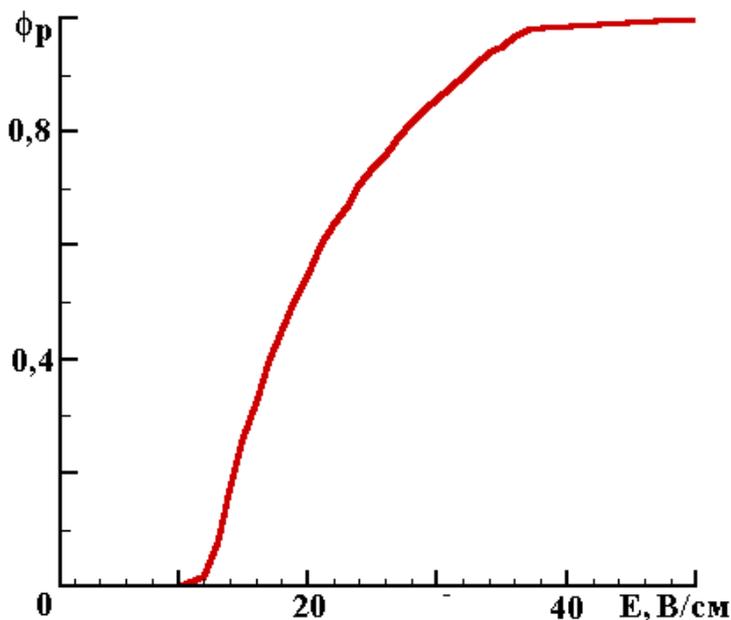


Рис. 5. Зависимость минимально допустимой концентрации смеси частицы – сок  $\phi_p$  от напряженности внешнего поля  $E$ .

При  $\phi < \phi_p$  омический нагрев приводит к перегреву со скоростью  $V_p > \Delta T/\Delta t = 30^{\circ}\text{C}$  за минуту. Зависимость рассчитана при помощи уравнений (4), (10) и параметров, приведенных в таблице.

Один из вариантов такого оптимизационного уравнения возможно получить, ориентируясь на максимальное время электрообработки и определяя зависимости  $E(\phi)$ , при которых перегрев не превышает  $\Delta T_{\max}$ . С уравнений (1), (4), (7), (10) имеем:

$$\Delta t = \tau = \exp(a + bE^c(\sigma_{\text{ef}}(\phi)/\sigma_s)^c) = \Delta T_{\max} (C\rho)/E^2 \sigma_{\text{ef}}(\phi). \quad (11)$$

Результаты численного решения этого уравнения приведены на рис. 6, 7 для случая  $\Delta T_{\max} = 30^\circ\text{C}$  и  $\Delta T_{\max} = 3^\circ\text{C}$ . Из полученных данных возможно сделать вывод, что при заданном значении предельного перегрева  $\Delta T_{\max}$  при увеличении объемной концентрации стружки в смеси необходимо увеличивать напряженность внешнего поля и уменьшать время электрообработки.

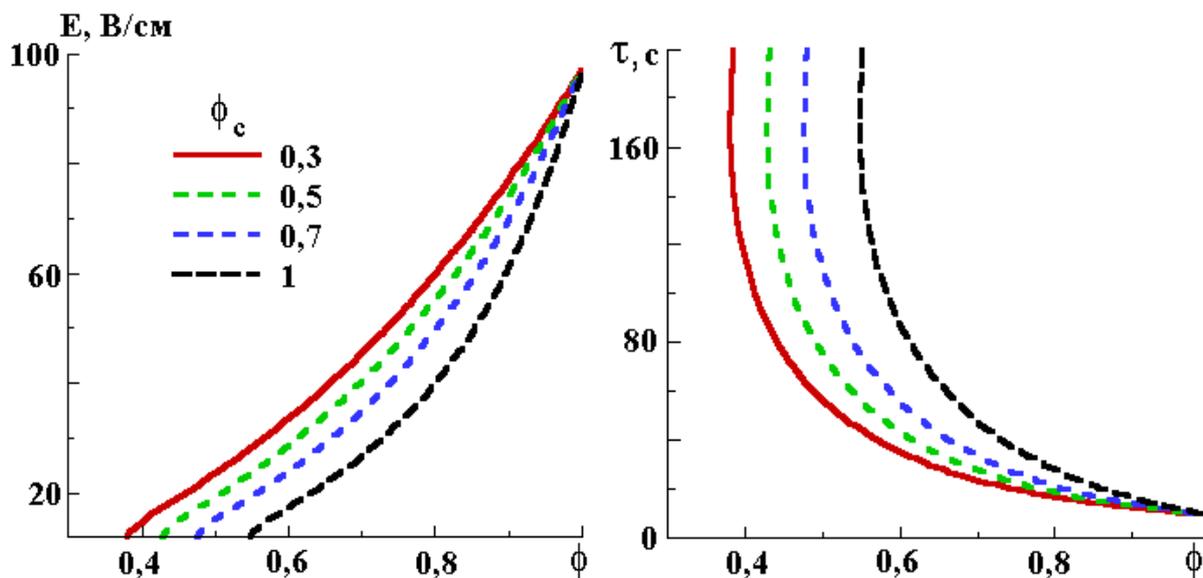


Рис. 6. Зависимости напряженности внешнего поля  $E$  и времени электрообработки  $\tau$  сокостружечной смеси от объемной концентрации стружки в смеси  $\phi$ . Рассчитаны при помощи уравнения (11) и параметров, приведенных в таблице ( $\Delta T_{\max} = 30^\circ\text{C}$ ).

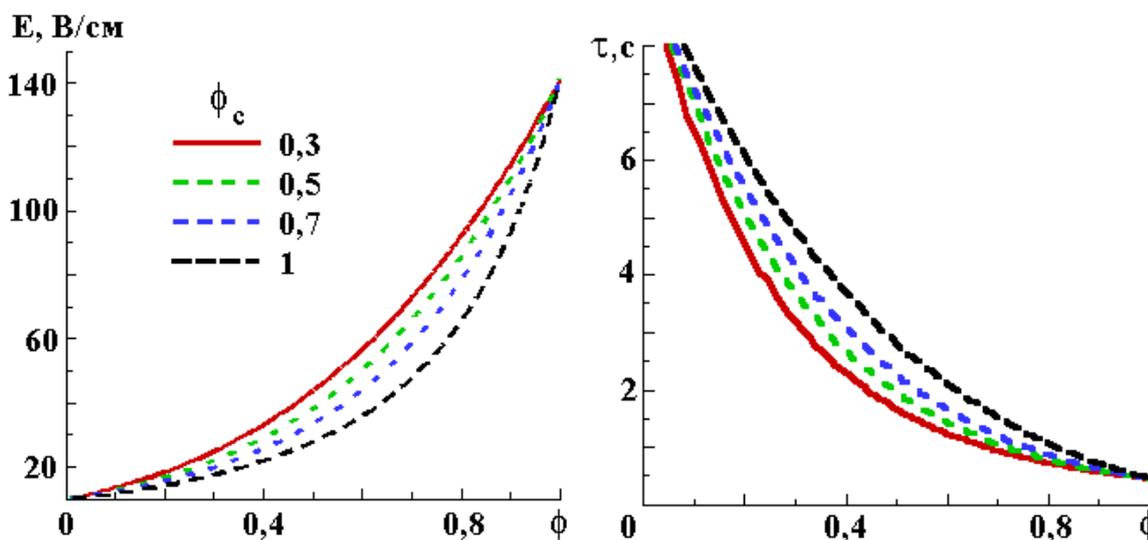


Рис. 7. Зависимости напряженности внешнего поля  $E$  и времени электрообработки  $\tau$  сокостружечной смеси от объемной концентрации стружки в смеси  $\phi$ . Рассчитаны при помощи уравнения (11) и параметров, приведенных в таблице ( $\Delta T_{\max} = 3^\circ\text{C}$ ).

Для промышленного случая, реализованного нами на аппарате непрерывного действия трубного типа, допустимы относительно небольшие перегревы  $\Delta T_{\max} \approx 3^\circ\text{C}$  при  $\phi \approx 0,25-0,3$ . Как видно из результатов проведенных расчетов, при таких условиях необходимо использовать поля не очень больших напряженностей ( $E \approx 10-30$  В/см) при времени обработки в несколько секунд. Увеличение

концентрации стружки приводит к необходимости использовать значительно большие поля  $E$ .

Полученные данные позволяют оптимизировать выбор напряженности поля  $E$  и времени электрообработки  $\tau$  при заданном значении объемной концентрации частиц в смеси  $\phi$  и могут быть использованы при отработке технологических режимов электрообработки сокостружечной смеси в производственных условиях.

### **Выводы**

В рамках обобщенного перколяционного подхода к теории эффективной среды проведены расчеты зависимостей эффективной удельной электропроводимости сокостружечной смеси от объемной концентрации стружки при различных значениях перколяционной концентрации.

Этот подход позволил получить обобщенные зависимости для расчетов омического нагрева сокостружечной смеси при различных значениях объемной концентрации стружки.

Предложено оптимизационное уравнение для выбора оптимальных значений напряженности электрического поля  $E$  и времени электрообработки  $\tau$  при заданной объемной концентрации стружки в смеси  $\phi$  и значении максимально возможного нагрева смеси.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *McLachlan D.S.* The complex permittivity of emulsions: an effective media-percolation equation. *Solid State Communs.*, v.72, N 8, p. 831–834 (1989).
2. *Sahimi M.* Applications of Percolation Theory (Taylor and Francis, London, 1994), *Sahimi M.* Flow phenomena in rocks: From continuum models to fractals, percolation, cellular automata and simulated annealing // *Rev. Mod. Phys.* 1993. Vol. 65. P. 1393.
3. *Landauer R.* Electrical Transport and optical Properties of Inhomogeneous Media // *American Institute of Physics*. 1978. № 40. P. 2.
4. *de Alwis A.A.P., Halden K., Fryer P.J.* Shape and conductivity effects in the ohmic heating of foods // *Chem.Engng Res.Des.* 1989. **67**. P. 157–168.
5. *de Alwis A.A.P., Fryer P.J.* A finite-element analysis of heat generation and transfer during ohmic heating of food // *Chem.Engng. Sci.* 1990. V. 45. № 6. P. 1547–1559.
6. *Halden K., de Alwis A.A.P., Fryer P.J.* Changes in electrical conductivity during ohmic heating of foods // *Int. J. Food Sci. Technol.* 1990. **25**. P. 9–25.
7. *Мухайлик В.А.* Термохимические исследования рекристаллизации сахарозы. Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Киев. 1975.

*Поступила 01.12.99*

### **Summary**

The present article states calculation results for dependencies of efficient specific electroconductivity of the juice-shaving mixture upon the volumetric shaving concentration at different values of percolative concentration within the generalized percolative approach to the efficient environment theory. This method of approach allowed keeping generalized dependencies for calculation ohmic heating at the juice-shaving mixture of different values of the volumetric shaving concentration. An optimizing equation was suggested for selecting optimum values of the electric field strength and electroprocessing time at given volumetric shaving concentration in the mixture and value of possible maximum material heating.