

Technologies. 78. 103020. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.103020.

11. Darvishi H. (2012). Mathematical modeling, moisture diffusion and energy consumption in thin layer drying of alfalfa. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 12(4). 511-516. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2012.12.4.1700.

12. Shrestha B.L., Wood H.C., Sokhansanj S. (2011). Microwave dielectric properties of alfalfa leaves from 0.3 to 18 GHz. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 60(8). 2926-2933. DOI: 10.1109/TIM.2011.2121270.

13. Shrestha B.L., Wood H.C., Tabil L., et al. (2017). Microwave permittivity-assisted artificial neural networks for determining moisture content of chopped alfalfa forage. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 20(3). 37-42. DOI: 10.1109/MIM.2017.7951691.

14. Chauhan P.D., Gadani D.H., Rana V.A. (2024). Effect of moisture content variation on die-

lectric properties of various plant leaves at microwave frequencies. *Scientific Reports*. 14(1). 13204. DOI: 10.1038/s41598-024-64266-3.

15. Arabhosseini A., Huismanb W., Müller J. (2011). Modeling of desorption of Alfalfa (*Medicago sativa*) stems and leaves. *Industrial Crops and Products*. 34. 1550-1555. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.05.018.

16. Gao X., Xuan C., Tang Z., et al. (2025). A dynamic drying process: Mathematical modeling and energy consumption optimization of alfalfa bales using hot air drying. *Renewable Energy*. 246. 122961. DOI: 10.1016/j.renene.2025.122961.

17. Cui Z.W., Xu S.Y., Sun D.W. (2004). Effect of microwave-vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves. *Drying Technology*. 22(3). 563-575. DOI: 10.1081/DRT-120030001.



УДК 664.143:537.3

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-260-6-85-91

Г.Б. Узунов, И.Б. Плотников, К.Б. Плотников
G.B. Uzunov, I.B. Plotnikov, K.B. Plotnikov

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ПЛОДОВ ОБЛЕПИХИ

IMPROVEMENT OF CONCENTRATION PROCESS USING OHMIC HEATING IN SEA BUCKTHORN PROCESSING

Ключевые слова: омический нагрев, прямой электронагрев, концентрирование, выпаривание, сгущение, плоды облепихи, вакуум-выпарной аппарат, электропроводность, удельная электропроводность, энергоэффективность.

На данный момент существует высокая конкурентность на рынке среди малых и средних фермерских хозяйств. Для повышения конкурентоспособности малых фермерских предприятий следует осуществлять переработку продукции у себя на предприятиях, за счёт этого существенно повышать рентабельность производства. Фермерские хозяйства, которые работают в области выращивания плодов облепихи, могут перерабатывать её в желейный мармелад. Основной единицей производства данного типа продукции является вакуум-выпарной аппарат. Данная единица отличается высокой стоимостью, и в связи с этим затруднён процесс внедрения полного цикла на малых предприятиях. Внедрение новых технологий, таких как омический нагрев с це-

люю концентрирования масс, является актуальным. Однако на данный момент нет результатов исследований по электропроводности желейной массы при её прямом нагреве в аппаратах, работающих под вакуумом. В качестве объекта исследования выступал аппарат омического нагрева, работающий под вакуумом. В результате приведённых исследований установлена зависимость электропроводности перерабатываемого продукта от температуры при различной напряженности электрического поля (10-25 В/см), которая описывается полиномом 4-й степени. При этом было установлено, что в начале кипения наблюдается резкое снижение электропроводности, что связано с образованием «сухих пятен» на электродах вследствие скопления пузырьков пара. Данное явление существенно повышает электрическое сопротивление и снижает электропроводность системы. Полученные значения могут лечь в основу управляющих систем автоматизации, разрабатываемых вакуум-выпарных аппаратов с применением прямого нагрева продукта для малых

фермерских хозяйств, занятых в области выращивания плодов облепихи.

Keywords: *ohmic heating, direct electric heating, concentration, evaporation, thickening, sea buckthorn fruits, vacuum evaporator, electrical conductivity, specific electrical conductivity, energy efficiency.*

Currently, the market for small and medium-sized farms is highly competitive. To increase the competitiveness of small farms, they should process their products in-house, thereby significantly increasing production profitability. Farms that grow sea buckthorn berries may process them into jelly marmalade. The primary production unit for this type of product is a vacuum evaporator. This unit is expensive making it difficult to implement a full-cycle process at small enterprises. The introduction of new technologies such as ohmic heating for mass

concentration is relevant. However, there are currently no studies on the electrical conductivity of jelly masses directly heated in vacuum-operated devices. The study utilized an ohmic heating device operating under vacuum. The conducted studies revealed dependence of the electrical conductivity of the processed product on temperature at varying electric field strengths (10-25 V cm) which was described by a fourth-degree polynomial. It was also found that at the onset of boiling, a sharp decrease in electrical conductivity is observed associated with the formation of "dry spots" on the electrodes due to the accumulation of steam bubbles. This phenomenon significantly increases electrical resistance and reduces the system's electrical conductivity. The obtained values may form the basis for automation control systems being developed for vacuum evaporators using direct heating of the product for small farms engaged in sea buckthorn growing.

Узунов Глеб Борисович, аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: uzunovgleb@edu.misis.ru.

Плотников Игорь Борисович, к.т.н., доцент, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: plotnikov-ib@mail.ru.

Плотников Константин Борисович, д.т.н., доцент, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com.

Uzunov Gleb Borisovich, post-graduate student, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation, e-mail: uzunovgleb@edu.misis.ru.

Plotnikov Igor Borisovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: plotnikov-ib@mail.ru.

Plotnikov Konstantin Borisovich, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com.

Введение

Отечественный рынок представляет собой жесткую конкуренцию производителей при производстве кондитерской продукции. Анализ продукции, на примере жележных кондитерских изделий, на прилавках г. Кемерово показывает, что их производит более 10 производителей. В условиях жесткой промышленной конкуренции предприятиям необходимо изыскивать все новые способы и возможности повышения привлекательности своих товаров, представляемых на рынке. При этом стоит отметить, что внедрение и использование нетрадиционного сырья в производстве продуктов питания является актуальным направлением, поскольку может привести к созданию продуктов с более высокими как органолептическими показателями, так и повышенной пищевой ценностью. Для малых предприятий, организованных на базе питомниководческих хозяйств, актуальным конкурентным преимуществом может стать изготовление крафтовой продукции. Данная продукция при малотоннажном производстве выигрывает в глазах потребителя с точки зрения уникальности техноло-

гии изготовления и повышенной ценности продукта. С экономической точки зрения может быть привлекательна для производителя, так как данная продукция имеет большую маржинальность.

Процесс сгущения массы происходит зачастую в вакуум-выпарных аппаратах. В данных единицах оборудования происходит подвод тепловой энергии. В качестве теплоносителя используется нагретая вода или пар. Аппараты характеризуются высокой энергоемкостью и длительностью процесса выпаривания, что существенно снижает их экономическую эффективность. С целью снижения потерь термолabileльных элементов в исходном сырье используется пониженное давление в процессе выпаривания, что приводит к необходимости создания разрежения.

Согласно данным из периодических источников отечественных и зарубежных ученых, можно сделать вывод, что применение прямого нагрева может заменить нагрев продукта через стенку [1-3]. Данная технология может быть внедрена в

вакуум-выпарные установки уже на существующем оборудовании.

Применение омического нагрева позволяет осуществлять нагрев продукта по всему объему аппарата в отличие от классического нагрева через стенку, где процесс нагрева осуществляется за счет теплопроводности продукта от периферии к центру рабочей камеры аппарата. Это существенно повышает эффективность производства в целом и позволяет получать продукт более высокого качества, сохраняя его первоначальные свойства. Поскольку процесс омического нагрева происходит с помощью подачи электрического тока, то он достаточно легко может быть автоматизирован.

Эта задача наиболее актуальна для питомниководческих хозяйств, не обладающих большими ресурсами и базирующихся на оборудовании с не высокой производительностью.

Цель исследований – совершенствование технологии переработки плодов облепихи на этапе концентрирования с применением омического нагрева на малых фермерских хозяйствах.

Задача – определить зависимость электропроводности перерабатываемого продукта от температуры при различной напряженности электрического поля.

Объекты и методы

На рисунке 1 представлен общий вид экспериментальной установки, которая состоит из корпуса (1), представляющего собой стеклянный сосуд из термостойкого стекла, герметично закрываемый крышкой (2).

В крышку установлены параллельно расположенные электроды (3), изготовленные из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, допущенной к контакту с пищевой продукцией. Также в крышке установлена термопара (4) для определения температуры продукта. Данный способ позволяет определять температуру быстрее, поскольку термопара обладает меньшей инертностью по сравнению со спиртовыми или ртутными термометрами. Для подключения установки к вакуумной системе предусмотрен клапан (5). Вакуумный насос соединен с конденсатоотводчиком. На рисунке не показан теплоизоляционный слой.

Установка подключалась к блоку контрольно-измерительных приборов, а именно к амперметру и вольтметру. Подача и изменение напряжения электрического тока осуществлялись с по-

мощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТР, ГОСТ 7518-83).

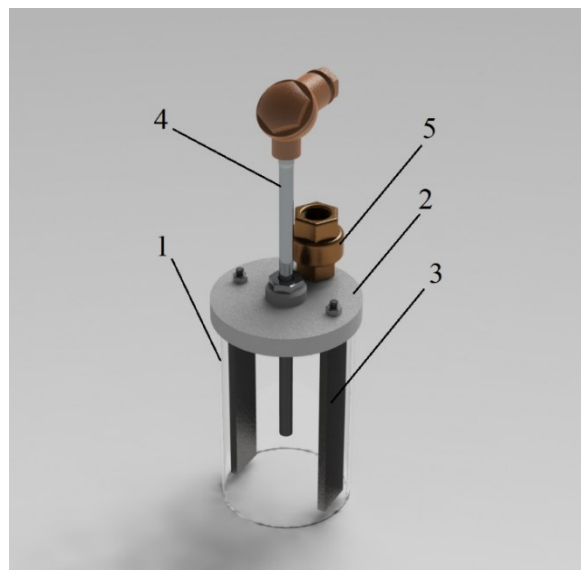


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки для концентрирования растворов с применением омического нагрева

На рисунке 2 представлена схема экспериментальной установки с параллельными электродами для омического нагрева концентрируемого раствора.

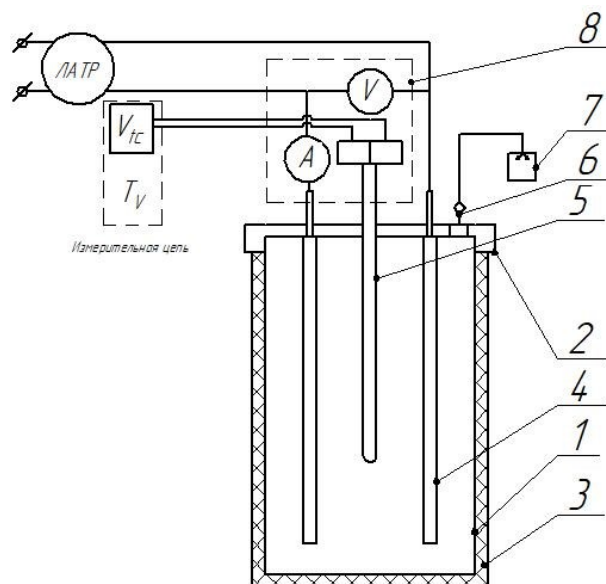


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – теплоизоляционный слой; 4 – электроды; 5 – термопара; 6 – обратный клапан; 7 – вакуум-насос; 8 – измерительный блок;
 T_v – внутренняя температура всех элементов цепи вольтметра,
 V_{TC} – напряжение разомкнутой цепи термопары (измерительная цепь измеряет V_{TC})

Экспериментальная установка для омического нагрева растворов работает следующим образом. В емкость помещается продукт, подлежащий концентрированию, после чего закрывается крышка и подключается вакуумный насос. После доведения разрежения до заданного значения подается напряжение. Изменение температурного режима отслеживается с помощью термодатчика. Величина напряжения регулируется с помощью ЛАТРа. При протекании электрического тока через продукт происходит его нагрев. Для исключения явления электролиза (разделения материала на кислород и водород) применяется переменный электрический ток частотой 50 Гц. Данная конструкция позволяет производить нагрев продукта по всему сечению аппарата, а не только в области контакта со стенкой, что существенно интенсифицирует процесс.

Результаты исследований и их обсуждение

Одним из основных параметров, оказывающих влияние на ход процесса выпаривания в

аппаратах с прямым нагревом, оснащенных вакуумной системой, является электропроводность продукта.

На рисунке 3 представлена зависимость градиента напряжения от температуры обрабатываемого продукта. Электропроводность испытуемого образца увеличивается с повышением температуры, что связано с ростом ионной подвижности, как указывалось в работе [4, 5]. В конечном счете это приводит к увеличению силы тока.

В результате прохождения электрического тока через продукт изменяется его структура и образуются пузырьки газа, что в итоге способствует снижению вязкости массы. Согласно графику, можно сделать вывод, что интенсивное образование газовых пузырьков (начало кипения) наблюдается при температуре, близкой к температуре кипения в созданных условиях. Это приводит к увеличению общего сопротивления для протекания тока, поскольку образующиеся газовые пузырьки являются диэлектриками.

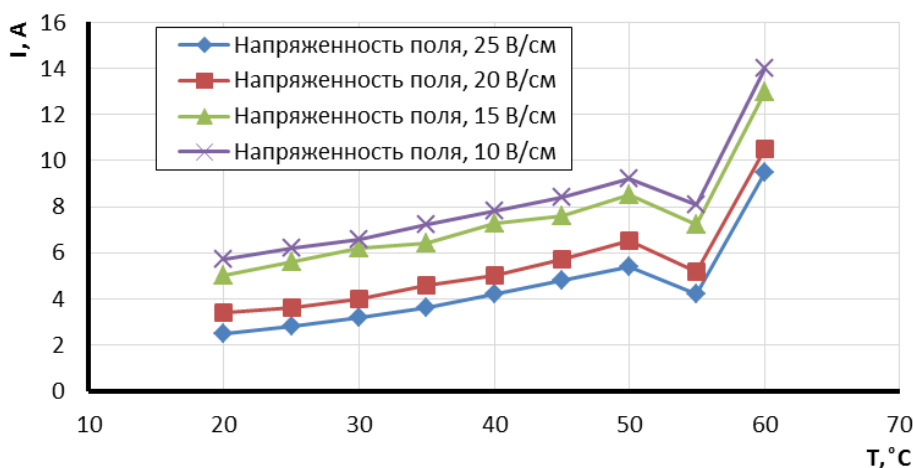


Рис. 3. Зависимость силы тока от температуры продукта при изменяющемся градиенте напряжения

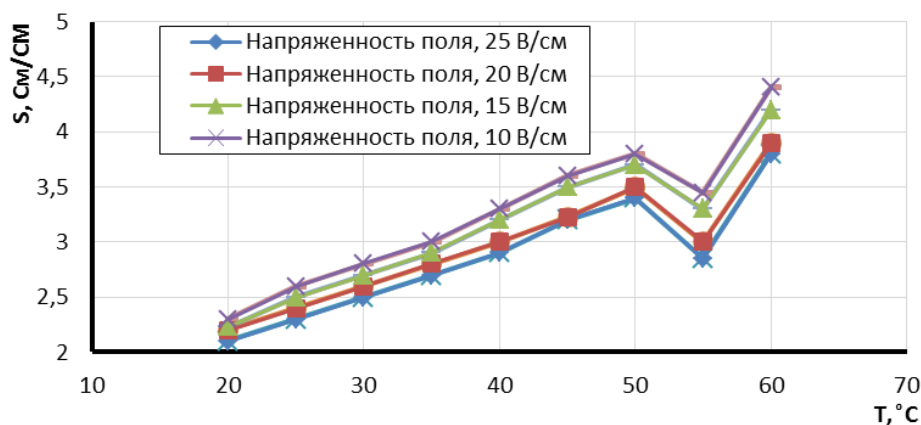


Рис. 4. Зависимость электропроводности от температуры перерабатываемого продукта при различных градиентах напряжения

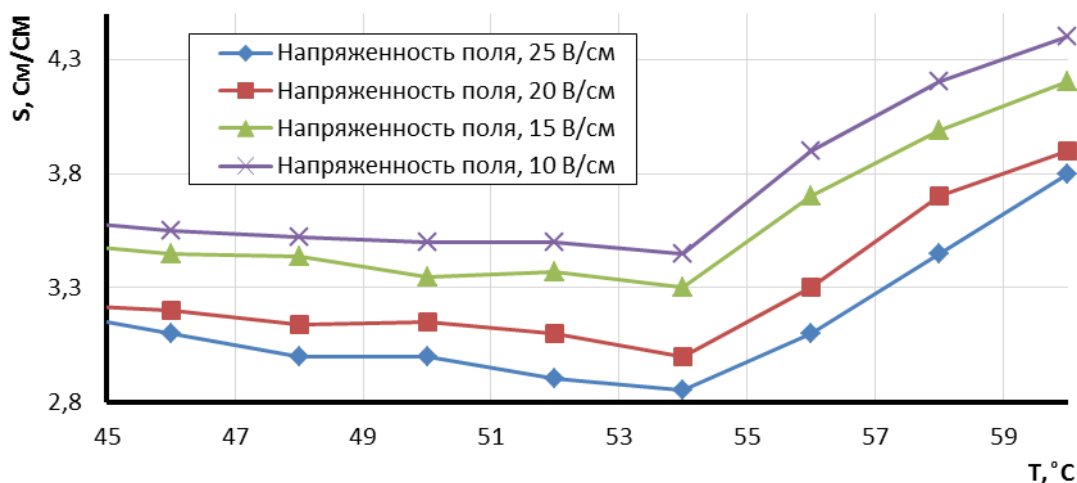


Рис. 5. Зависимость электропроводности от температуры $T > 45^\circ\text{C}$

Повышение электропроводности продукта с ростом температуры объясняется снижением его удельного электрического сопротивления, что, в свою очередь, облегчает движение ионов.

Из представленных данных на графике 3 можно сделать вывод, что электропроводность возрастает по мере увеличения температуры, причем на данном этапе прослеживается почти линейная зависимость, однако по мере достижения точки начала кипения образца происходит резкое снижение, это связано главным образом с образованием пара. В первый период железная масса (ионный раствор солей, кислот, ионов металлов) при нагреве снижается его вязкость, за счет этого наблюдается большая подвижность ионов. Этот факт объясняется следующей зависимостью:

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu, \quad (1)$$

где σ – проводимость;

n – концентрация носителей;

e – заряд;

μ – подвижность.

Из данной зависимости следует, что рост подвижности напрямую приводит к росту проводимости. По мере испарения влаги из образца происходит существенное изменение электропроводности, что приводит к ее увеличению. Снижение электропроводности в зоне начала кипения объясняется следующим образом. По мере достижения точки кипения происходит образование пузырьков пара, которые экранируют прохождение электрического тока за счет создания высокого сопротивления. Сопротивление экранированных участков на порядок выше сопротивления перерабатываемого продукта. На первом этапе зарождения пузырьков они обра-

зуются на поверхности электродов, тем самым перекрывая пути течению тока. Согласно данным, приведенным в работе [1], сначала образуются мелкие пузырьки, а впоследствии они объединяются, образуя паровую пленку на поверхности электрода. Данный эффект также называется эффектом «сухого пятна». Образующаяся прослойка создает дополнительное сопротивление, и в результате этого наблюдается резкое снижение тока и проницаемости.

Электрическая проводимость падает по мере увеличения градиента напряжения, возможно, в результате увеличения скорости образования пара, вызванной градиентом напряжения. Последнее исследование омического нагрева подтверждает такое поведение. Например, аналогичные структурные сдвиги и ионная подвижность инициируют повышение электропроводности смешанного цитрусового сока с температурой во время омического нагрева [7, 8].

После резкого падения согласно графикам, изображенным на рисунках 3 и 4, наблюдается стабильный рост. Данный эффект связан со стабилизацией процесса омического нагрева. Рассматриваемый этап связан с объемным кипением и гомогенизацией процесса. В данном случае пузырьки пара начинают активное отделение от поверхности электродов, за счет этого паровая пленка, которая была присуща предыдущему этапу, не успевает стабилизироваться, что существенно интенсифицирует процесс, наблюдается стабилизация эффективной площади электродов. Стоит отметить, что величина контакта все равно меньше за счет активного процесса кипения. Постепенно наблюдается турбулизация потока за счет активного парооб-

разования и перемещения пузырьков пара, благодаря этому существенно ускоряется процесс массообмена, а образуемая среда способствует стабильному протеканию электрического тока.

На заключительной стадии также наблюдается постепенный рост электропроводности, хотя при стабилизации должно наблюдаться относительно стабильное значение. В данном случае повышение значения электропроводности связано, как и на первом этапе, с величиной подвижности ионов, также повышение температуры существенно снижает ее вязкость.

Обработка полученных результатов позволила получить регрессионные уравнения, описывающие зависимость электропроводности перерабатываемого продукта от температуры. Данная зависимость описывается полиномом четвертой степени:

$$\sigma = C_1 T^4 - C_2 T^3 + C_3 T^2 - C_4 T + C_5, \quad (2)$$

где C_n – константы регрессии;

T – температура образца при омическом нагреве в любой момент времени t , °C.

В таблице приведены значения констант для соответствующих градиентов напряжений.

Таблица

Константы регрессии электропроводности

Градиент напряжения, В/см	Температурный диапазон 20-60°C				
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
10	4E-05	0,0058	0,3108	7,0233	61,988
15	4E-05	0,0055	0,2969	6,7769	57,358
20	4E-05	0,0054	0,2968	6,8074	58,739
25	4E-05	0,0055	0,2934	6,5613	57,027

Высокие значения среднеквадратичного отклонения R (0,9431-0,9544) свидетельствуют о высокой точности эмпирической связи для представления изменений электропроводности в зависимости от температуры перерабатываемого продукта при выпаривании с применением омического нагрева под остаточным давлением.

Выводы

Обоснованы рациональные режимы процесса выпаривания на основе формирования рецептуры с необходимой электропроводностью. Экспериментально установлено, что удельная электропроводность облепихового пюре в диапазоне температур 20-60°C подчиняется полиномиальной зависимости четвертой степени ($R^2 > 0,94$).

Библиографический список

1. Арипова, К. О. Системный анализ процесса концентрирования сока методом выпаривания / К. О. Арипова, Д. А. Сарibaева, А. М. Хамдамов. – Текст: непосредственный // *Advances in Science and Technology: сборник статей LXX Международной научно-практической конференции*, Москва, 31 июля 2025 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2025. – С. 67-69.
2. Шемякин, А. Ю. Исследование процесса выпаривания на лабораторном образце концен-

траторе-выпаривателе / А. Ю. Шемякин, А. А. Царева, Н. С. Гришин. – Текст: непосредственный // *Вакуумная техника и технология: материалы десятой Российской студенческой научно-технической конференции*, Казань, 12-15 апреля 2021 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. – С. 126-127.

3. Тихонов, Н. В. Исследование процессов концентрирования и ультрапастеризации соков методом прямого электронагрева: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств» / Тихонов Николай Вячеславович. – Кемерово, 2013. – 152 с. – Текст: непосредственный.

4. Javed, T., et al. (2024). System Design, Modelling, Energy Analysis, and Industrial Applications of Ohmic Heating Technology. *Food and Bio-process Technology*. 18. 2195-2217. DOI: 10.1007/s11947-024-03568-w.

5. Burak, L., Sapach, A. (2024). Use of omic heating technology in the process of processing fruits and vegetables. Overview of the subject field. *Food Systems*. 7. 59-70. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70.

6. Aslam, R., Alam, M., Vishwakarma, R., Maqsood, S. (2024). Ohmic heating assisted vacuum evaporation chamber: Finite element analysis and evaluation of parameters for processing of am-

la juice. *Computers and Electronics in Agriculture*. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109249.

7. Aslam, R., Alam, M. (2024). Storage behaviour of ohmic heated and ultrasonicated amla juice: AI mediated correlation between ascorbic acid content and color attributes. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 18. 1-12. DOI: 10.1007/s11694-024-02549-z.

8. Çokgezme, Ö., Sabanci, S., Çevik, M., et al. (2017). Performance analyses for evaporation of pomegranate juice in ohmic heating assisted vacuum system. *Journal of Food Engineering*. 207. 10.1016/j.jfoodeng.2017.03.015.

References

1. Aripova, K. O. Sistemnyy analiz protsesssa kontsentrirvaniya soka metodom vyparivaniya / K. O. Aripova, D. A. Saribaeva, A. M. Khamdamov // *Advances in Science and Technology: Sbornik statey LXX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 31 iyulya 2025 goda.* – Moskva: OOO "Aktualnost.RF", 2025. – S. 67-69.

2. Shemyakin, A. Yu. Issledovanie protsesssa vyparivaniya na laboratornom obratse kontsentratore-vyparivatele / A. Yu. Shemyakin, A. A. Tsareva, N. S. Grishin // *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya: Desyataya Rossiyskaya studencheskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: materialy konferentsii, Kazan, 12–15 aprelya 2021 goda.* – Kazan: FGBOU VO "KNITU", 2021. – S. 126-127.

3. Tikhonov, N. V. Issledovanie protsessov kontsentrirvaniya i ultrapasterizatsii sokov metodom pryamogo elektronagreva: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.18.12 / Tikhonov Nikolay Vyacheslavovich. – Kemerovo, 2013. – 152 s.

4. Javed, T., et al. (2024). System Design, Modelling, Energy Analysis, and Industrial Applications of Ohmic Heating Technology. *Food and Bioprocess Technology*. 18. 2195-2217. DOI: 10.1007/s11947-024-03568-w.

5. Burak, L., Sapach, A. (2024). Use of omic heating technology in the process of processing fruits and vegetables. Overview of the subject field. *Food Systems*. 7. 59-70. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70.

6. Aslam, R., Alam, M., Vishwakarma, R., Maqsood, S. (2024). Ohmic heating assisted vacuum evaporation chamber: Finite element analysis and evaluation of parameters for processing of amla juice. *Computers and Electronics in Agriculture*. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109249.

7. Aslam, R., Alam, M. (2024). Storage behaviour of ohmic heated and ultrasonicated amla juice: AI mediated correlation between ascorbic acid content and color attributes. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 18. 1-12. DOI: 10.1007/s11694-024-02549-z.

8. Çokgezme, Ö., Sabanci, S., Çevik, M., et al. (2017). Performance analyses for evaporation of pomegranate juice in ohmic heating assisted vacuum system. *Journal of Food Engineering*. 207. 10.1016/j.jfoodeng.2017.03.015.



УДК 581.1+621.3.011.21

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-260-6-91-98

А.С. Угловский

A.S. Uglovskiy

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНЫХ ТКАНЕЙ МЕТОДОМ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR STUDYING BIOIMPEDANCE CHARACTERISTICS OF PLANT TISSUES USING IMPEDANCE SPECTROSCOPY

Ключевые слова: биоимпеданс, AD5933, модель Коула–Коула, фитомониторинг, дисперсия импеданса, электродная поляризация.

Keywords: bioimpedance, AD5933 impedance converter, Cole-Cole model, phytomonitoring, impedance dispersion, electrode polarization.