УДК 663.44

А.М. Попов, Н.В. Тихонов, И.Н. Тихонова

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И СТЕРИЛИЗАЦИИ СОКОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО НАГРЕВА

В данной статье рассматривается проблема концентрирования соков методом омического (прямого) нагрева. Авторами были проведены постановочные экспериментальные исследования на трех разновидностях соков. Установлено, что процесс концентрации соков омическим нагревом является безынерционным, поэтому процесс пенообразования при омическом нагреве соков легко управляется путем корректировки напряжения. Также процесс обладает возможностью поддерживать постоянную температуру раствора, исключая перегрев, коагуляцию и обеспечивает сохранность БАВ. Масса электродов в процессе нагрева не изменяется. На основании анализа полученных результатов, а также привлечения имеющихся данных из других областей применения омического нагрева жидких сред предполагается изготовление экспериментальной установки омического нагрева соков с коаксиальным размещением электродов и системой автоматизации параметров процесса.

Прямой нагрев, энергозатраты, выпаривание, пенообразование.

Введение

Важнейшими продуктами промышленного производства на различных стадиях технологического потока пищевых и лекарственных продуктов являются жидкие концентраты соков, молока, сыворотки, экстракты трав, ягод и других продуктов. На различных стадиях получения этих веществ имеется целый ряд существенных недостатков. Периодичность циклов не позволяет механизировать и автоматизировать процесс выпаривания или растворения, обеспечить нормальные условия труда. Необходимость защиты теплопередающей поверхности фторопластами и другими материалами, устойчивыми в коррозионном отношении, естественно, не приводит к увеличению удельной мощности греющих камер теплообменников, обогреваемых «глухим» паром. Процессы растворения, как и выпаривания, десорбции, лишенные вышеперечисленных недостатков, целесообразно осуществлять в аппаратах электродного типа (с прямым электрическим нагревом), в которых используется интенсифицирующее воздействие переменного электрического тока промышленной частоты, проходящего между электродами. Важно и то, что электротехнологии во многих случаях более целесообразны с точки зрения сохранения стабильной экологической обстановки.

Значительный вклад в развитие теоретических предпосылок и практики использования аппаратов электродного типа внесли Н.И. Гельперин, Н.П. Курин, Н.С. Тураев, В.Л. Пищулин, В.И. Косинцев и другие ученые страны, но остался целый ряд нерешенных проблематических вопросов.

В последние годы активно развивается применение в пищевых технологиях электрического тока непосредственно для обработки сырья и продуктов, а именно: электрогидравлический шок, электропорация (разрушение клеточных мембран) и нагрев за счет джоулевой теплоты – прямой электронагрев (омический нагрев).

Такие способы воздействия на пищевое сырье в некоторых случаях, особенно когда энергоносителем выступает электроэнергия, могут заменить традиционный нагрев за счет теплопроводности, конвекции и излучения, поскольку генерирование теплоты здесь происходит в самом продукте, что позволяет существенно повысить энергоэффективность производственных процессов.

Впервые про прямой электронагрев для пастеризации молока упоминалось в 1919 году [4], но успешное применение осуществлено и описано Гетчелом в 1935 году.

Другое практическое применение в виде устройства для бытового применения прямого электронагрева было отмечено в 1938 году в США в виде так называемого «процесса электропюре». Но это направление развития бытовой техники не получило дальнейшего развития из-за высокой стоимости, несовершенства средств электробезопасности, отсутствия инертных относительно рабочей среды материалов для изготовления электродов. Несмотря на некоторые недостатки прямого электронагрева, в последние две декады XX века продолжались исследования применения прямого электронагрева в технологиях обработки фруктов, овощей, мясопродуктов, молокопродуктов [1].

Прямой электронагрев является также одним из современных методов осуществления ультравысокотемпературного процесса стерилизации (UHT sterilization process).

Преимущество прямого электронагрева в сравнении с традиционным нагревом: быстрый и однородный нагрев, более высокая степень стерилизации при более низких температурах обработки, более высокое качество продукции, возможность обработки продукта с высоким содержанием твердых составляющих, непрерывность производственного процесса и надежный контроль его параметров.

Пищевая промышленность является одной из наиболее энергоемких областей. По этой причине заслуживает особого внимания аспект энергосбережения. Поскольку стоимость энергии возрастает, а энергоснабжение становится более проблематичным, научные работники, инженеры и работники промышленности разных стран выискивают приемлемые пути уменьшения потребления энергии в данной сфере. С помощью прямого электронагрева становится доступной обработка продуктов с включениями размером до 10–13 мм, что затруднительно при ведении процессов в обычных теплообменных аппаратах [3]. Кроме того, по сравнению с обычными теплообменниками эксплуатация аппаратов прямого электронагрева и их обслуживание более просты.

Прямой электронагрев может использоваться для нагревания жидких пищевых продуктов, содержащих большие частицы, такие как супы, тушеные продукты, ломтики фруктов в сиропах и соусах, а также для нагревания термочувствительных жидкостей. Этот способ подвода энергии целесообразно использовать при тепловой обработке протеиновых продуктов, которым свойственна термическая денатурация и коагуляция. Например, яичный белок может быть нагрет и законсервирован без коагуляции. Одним из направлений применения прямого электронагрева может быть очистка фруктов и овощей от кожуры. При этом можно в значительной мере уменьшить использование щелочи, обычно применяемой для таких операций, что поможет уменьшить выбросы в окружающую среду [2].

Сегодня ряд зарубежных фирм выпускают промышленные аппараты прямого электронагрева для пищевых технологий. Среди них Emmepiemme SRL (Италия), APV (Великобритания) и прочие. Мощность таких аппаратов составляет 50–500 кВт, температура обработки продукта 50–170 ˚С, производительность 500–3000 кг/ч.

С использованием прямого электронагрева значительное количество перерабатывающих заводов разных стран (Италия, Греция, Франция, Мексика, Япония) уже вырабатывают цельные консервированные фрукты, фрукты в соусах, ломтиках и кубиках [2]. В США прямой электронагрев применяется для производства низкокислотных фракционных (с кусочками) продуктов в консервных банках, а также для пастеризации яичных белков.

Анализ, проведенный в университете штата Миннесота в 90-х годах XX века, показал, что применение прямого электронагрева является экономически целесообразным, поскольку дает возможность существенно повысить качество продуктов [4]. Это дало толчок к развитию технологий и оборудования для прямого электронагрева в пищевых областях. На сегодня стоимость оборудования для прямого электронагрева существенно снизилась и диапазон продуктов, для изготовления которых применяется прямой электронагрев, значительно расширился.

В 2004 году ученые и производители Словацкой Республики начали проект FOOD Prostart с целью повышения конкурентоспособности продукции словацкой пищевой промышленности на рынках Австралии, Японии и Северной Америки. Они считают, что традиционные методы нагрева, где теплота образуется за пределами продукта и передается продукту за счет теплопередачи или конвекции, непригодны для производства продукции из фруктов и овощей, содержащей частицы первичного сырья. При этом наблюдается перегрев жидких компонентов и недостаточный прогрев частиц, потеря пищевых и органолептических качеств продукта. Целью проекта является решение указанных проблем с помощью прямого электронагрева.

Согласно данным, приведенным в справочнике энергоэффективности, выпущенном при участии Департамента анализа энергетики США, перспективными сферами применения прямого электронагрева является переработка овощей и фруктов, включая бланширование, упаривание, дегидратацию, ферментацию и экстракцию. В опытах, проведенных в университете штата Луизиана, образцы сладкого картофеля (батата) обрабатывались прямым электронагревом перед сушкой замораживанием. Это повышало степень высушивания на 25 %, что приводило в свою очередь к значительной экономии электроэнергии и сокращению времени на обработку. Вместе с тем указано, что на эффективность процесса влияют такие параметры процесса, как частота переменного тока, напряжение, температура, до которой нагревается рабочая среда, и ее электропроводность [3].

Действительно, основными параметрами, характеризующими процесс прямого электронагрева, являются частота тока, напряженность электрического поля и электрофизические свойства продукта. Увеличение напряженности электрического поля или уменьшение сопротивления продукта приведет к увеличению рабочего тока и, как следствие, к интенсификации выделения джоулевой теплоты. Также известно, что интенсивность нагревания со снижением частоты увеличивается. Так, наибольший эффект с точки зрения интенсивности нагревания имеет место при применении постоянного тока. Но использование постоянного тока для непосредственного нагрева пищевых продуктов крайне ограниченно, а в большинстве случаев является невозможным вследствие электролиза [6, 7, 9].

Объекты и методы исследований

С увеличением частоты тока эффективность прямого нагрева продуктов уменьшается. Это происходит вследствие уменьшения глубины проникновения электромагнитного поля в объем продукта (поверхностный эффект). Таким образом, применение токов высокой частоты фактически может привести к образованию неравномерных полей температур в нагреваемом продукте.

Под действием электрического поля электроны и ионы вещества перемещаются от одного электрода к другому, образуя ток проводимости. Плотность тока проводимости:

$$j_{пр} = \frac{\Sigma v \cdot \upsilon_i \cdot q_i}{V},$$

где V – объем, для которого находится среднее значение тока проводимости; v – скорости; q – заряды частиц с учетом их знака.

В общем случае в неоднородном электрическом поле необходимо пользоваться не средней плотностью тока, а плотностью тока в данной точке, которая определяется как предел средней плотности тока при стремлении объема к нулю:

$$j_{np} = \lim_{V \to 0} \frac{\Sigma v \cdot \upsilon_i \cdot q_i}{V}.$$

Здесь стремление объема к нулю рассматривается макроскопически, т.е. при условии, что линейные размеры этого объема значительно превосходят расстояние между соседними зарядами. Плотность тока проводимости является функцией напряженности электрического поля. Если зависимость между j и E характеризуется линейными дифференциальным или алгебраическим уравнениями, то материал относят к линейным, обладающим линейной проводимостью. Если же связь между j и E описывается нелинейным уравнением, то материал называют нелинейным.

Большинство пищевых продуктов имеют линейную вольт-амперную характеристику в широком диапазоне E и с достаточной точностью описываются дифференциальным законом Ома:

$$j_{np} = \sigma E,$$

где σ – удельная проводимость, не зависящая от величины E. При этом если E изменяется скачком от нуля до E_0, то и ток проводимости изменяется также скачком от нуля до j_{np} 0. При заметной инерции ионов, образующих ток проводимости, они могут не успевать мгновенно следовать за изменением электрического поля. Однако в диапазоне частот 0–14 кГц, применяемых для электроконтактного (омического) нагрева, инерцией зарядов можно пренебречь [5].

От источника тока к продукту, помещенному между электродами, передается электрическая энергия, величина которой:

$$W = \int_0^t UIdt.$$

Эта энергия преобразуется в тепло, образуя в продукте внутренние источники тепла. Перейдя от общей энергии, поступающей от источника к объекту обработки, к удельной энергии, приходящейся на единицу объема вещества, запишем:

$$W = \frac{W}{V} = \frac{W}{S \cdot d} = \int_0^t jEdt = \int_0^t (j_{np} + j_{см})Edt,$$

где V – объем материала с сечением S, равным площади электродов, и с толщиной, равной расстоянию между электродами d. При линейной зависимости между j_{np} и E удельная энергия, полученная от тока проводимости:

$$W = \int_0^t \sigma E_0^2 dt = \sigma E^2 = j_{np} E_0 t,$$

а соответствующая мощность:

$$P_{0np} = \frac{\partial W_{0np}}{\partial t} = \sigma E^2 = j_{np} E_0.$$

Эта мощность составляет удельные потери, т.е. энергию, которая в единицу времени расходуется на нагрев материала за счет токов проводимости.

Вторая составляющая энергия может быть также представлена из двух слагаемых, обусловленных мгновенным и релаксационным смещением:

$$W_{0см} = W_{0см} + W_{0рел} = \int_0^t E \frac{\partial D_{мгн}}{\partial t} dt + \int_0^t E \frac{\partial D_{рел}}{\partial t} dt.$$

В строгом рассмотрении можно показать, что токи смещения в отличие от токов проводимости не сопровождаются выделением джоулевой теплоты. Это положение строго справедливо также к токам смещения в диэлектриках, диалектическая постоянная которых не зависит от температуры (квазиупругие диполи). Что же касается диэлектриков с постоянными диполями, то изменение поляризации диэлектриков этого класса сопровождается некоторым выделением или поглощением тепла и токи смещения в них сопровождаются тепловыми эффектами.

Однако для большинства пищевых продуктов в диапазоне частот, применяемых при электроконтактной обработке, токами смещения можно пренебречь. Это объясняется тем, что для большинства пищевых продуктов характерно значительное содержание влаги, а для воды резонансная частота, соответствующая собственной частоте колебаний диполей, лежит в области 10^9 Гц, что на много порядков выше частот, применяемых при электроконтактной обработке [5, 7, 9]. При таком различии частот поглощением энергии переменного электрического поля диполями можно пренебречь. Например, для воды – общего компонента многих пищевых продуктов – мощность рассеивания при высокочастотном нагреве определяют по формуле

$$P_0 = 0{,}555 \cdot 10^{-5} \varepsilon' \cdot f \cdot tgN \cdot E^2,$$

где P_0 – активная мощность; ε' – вещественная диэлектрическая проницаемость; f – частота, кГц; $tg\chi$ – тангенс угла диэлектрических потерь; E – напряженность электрического поля.

При f = 10 кГц, E = 1000 В/м, T = 15 °С, ε' = 87, $tg\chi$ = 1,4 мощность рассеивания равна 6,76 Вт/м^3, что на 2–3 порядка меньше мощности, вычисленной без учетов токов смещения.

Кроме расходования электроэнергии на нагрев, часть энергии затрачивается на разрушение электродов. В ряде исследований разрушение электродов под действием переменного электрического тока в электролитах используется для синтеза соединений. Так, в [5, 6, 8, 9] было определено, что скорость разрушения металлов электродов прямо пропорциональна плотности тока. Зависимость скорости разрушения металлов в ходе электролиза от плотности тока выражается эмпирической формулой [6, 7]:

$$q = q_0 + q_1 \cdot J^n,$$

где q_0, q_1 и n – эмпирические коэффициенты, зависящие от температуры.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследований в США в университете штата Миннесота [4] было определено, что влияние материалов электродов на продукт можно исключить двумя способами:

– использованием сталей, неопасных для жизни при частичной диссоциации ионов металла в раствор;

– применением высоких частот (свыше 100 кГц), исключающих растворение металла.

Так как для исследования прямого электронагрева была взята промышленная частота тока (в соответствии с ГОСТ 13109-97 (50±0,2) Гц), то исключить влияние на продукт можно только подбором материала электродов. В нашем случае в качестве электродов использовалась сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 11068-81), обеспечивающая нейтральную реакцию с различными агрессивными химическими средами и реагентами даже при нагреве до 300 ^{0}С. Для «пищевых сред» справочная скорость коррозии для данной стали составляет ~0,01 мм/год.

Задача первичных исследований – определить характер протекания процесса прямого электронагрева плодово-ягодных соков в условиях атмосферного давления, влияние формы и расположения электродов на интенсивность процесса и физико-химические свойства получаемого продукта.

Для исследования были взяты различные водные растворы:

– концентрат яблочного сока «Яблоко 003» по ТУ 9185-015-00333204-2005, изменение № 1 «Концентраты для пищевых продуктов на натуральном сырье»;

– диффузионный свекольный сок (отвар), полученный в лабораторных условиях из столовой свеклы сорта «Бордо 237»;

– витаминный экстракт пихты сибирской «ВЭПС®» по ТУ 9759-003-14405189-05.

Исходные данные представлены в табл. 1.

В качестве электрохимической ячейки был взят стеклянный термостойкий химический стакан объемом 600 мл, ГОСТ 9147-80. Поверхность испарения составляла $5{,}024 \cdot 10^{-6}$ м^2. Электроды выполнены плоскопараллельными из полосок стали марки 12Х18Н10Т толщиной 2 мм, шириной 18 мм и длиной на всю глубину стакана до упора в дно. Фиксированное расстояние между электродами 20 мм.

Таблица 1

Объекты исследования

Наименование	Концентрация сухих веществ по шкале BRIX
Восстановленный яблочный сок	8,18*
Свекольный сок	1,34
Экстракт пихты сибирской	1,21

*Получено путем разбавления концентрата дистиллированной водой.

В качестве регулируемого источника тока использовался лабораторный автотрансформатор марки ЛАТР-2, в управляемую цепь которого были включены для контроля параметров электрохимической ячейки стрелочный амперметр и вольтметр по ТУ 23-04.3547-78Е.

В стакан заливалось 500 мл. Упаривание велось в десять раз (до 50 мл). Процесс прямого электронагрева проводился при постоянном напряжении. Параметры процесса для трех случаев представлены в табл. 2–4.

Таблица 2

Яблочный сок

Время, мин	Температура, ^{o}С	Напряжение, В	Сила тока, А	Плотность тока, А/м^2	Объем, м$^3 \cdot 10^3$	Площадь электрода в растворе, м^2
0	25	50	3	1667	0,5	0,0018
5	30	–//–	3,8	2111	0,5	0,0018
10	50	–//–	4,8	2667	0,5	0,0018
15	100	–//–	5	2778	0,5	0,0018
20	–//–	–//–	4,7	2749	0,475	0,00171
25	–//–	–//–	4,6	2840	0,45	0,00162
30	–//–	–//–	4,5	2976	0,42	0,001512
35	–//–	–//–	4,4	3216	0,38	0,001368
40	–//–	–//–	4,3	3318	0,36	0,001296
45	–//–	–//–	4,2	3431	0,34	0,001224
50	–//–	–//–	4	3704	0,3	0,00108
55	–//–	–//–	3,8	3770	0,28	0,001008
60	–//–	–//–	3,7	4111	0,25	0,0009
65	–//–	–//–	3,6	4545	0,22	0,000792
70	–//–	–//–	3,5	4861	0,2	0,00072
75	–//–	–//–	3,3	5093	0,18	0,000648
80	–//–	–//–	3,2	5229	0,17	0,000612
85	–//–	–//–	2,9	5035	0,16	0,000576
90	–//–	–//–	2,6	4815	0,15	0,00054
95	–//–	–//–	2,5	5342	0,13	0,000468
100	–//–	–//–	2,3	5324	0,12	0,000432
105	–//–	–//–	2,2	5556	0,11	0,000396
110	–//–	–//–	2	5556	0,1	0,00036
115	–//–	–//–	1,8	5556	0,09	0,000324
120	–//–	80	1,3	4514	0,08	0,000288
125	–//–	–//–	1,2	4762	0,07	0,000252
150	–//–	–//–	1,2	5556	0,06	0,000216
155	–//–	–//–	1,1	6111	0,05	0,00018

Таблица 3

Свекольный сок

Время, мин	Температура, °С	Напряжение, В	Сила тока, А	Плотность тока, А/м^2	Объем, м^3·10^3	Площадь электрода в растворе, м^2
0	25	30	4	2222	0,5	0,0018
5	50	–//–	4,7	2611	0,5	0,0018
10	100	–//–	5,5	3056	0,5	0,0018
15	–//–	–//–	5	2834	0,49	0,001764
20	–//–	–//–	4,8	2778	0,48	0,001728
25	–//–	–//–	4,5	2660	0,47	0,001692
30	–//–	–//–	4,2	2536	0,46	0,001656
35	–//–	–//–	3,8	2346	0,45	0,00162
40	–//–	–//–	3,5	2261	0,43	0,001548
45	–//–	–//–	3	1984	0,42	0,001512
55	–//–	–//–	2,8	1944	0,4	0,00144
60	–//–	–//–	2,7	1923	0,39	0,001404
65	–//–	–//–	2,6	1901	0,38	0,001368
70	–//–	–//–	2,5	1877	0,37	0,001332
75	–//–	–//–	2,4	1852	0,36	0,001296
80	–//–	–//–	2,3	1879	0,34	0,001224
85	–//–	–//–	2,2	1852	0,33	0,001188
90	–//–	–//–	2	1736	0,32	0,001152
95	–//–	–//–	–//–	1792	0,31	0,001116
100	–//–	–//–	–//–	1852	0,3	0,00108
105	–//–	–//–	–//–	1984	0,28	0,001008
110	–//–	–//–	–//–	2058	0,27	0,000972
115	–//–	–//–	–//–	2222	0,25	0,0009
120	–//–	–//–	–//–	2315	0,24	0,000864
125	–//–	–//–	–//–	2416	0,23	0,000828
130	–//–	–//–	–//–	2525	0,22	0,000792
135	–//–	–//–	–//–	2646	0,21	0,000756
140	–//–	–//–	–//–	2778	0,2	0,00072
145	–//–	–//–	–//–	2924	0,19	0,000684
150	–//–	–//–	–//–	3086	0,18	0,000648
155	–//–	40	–//–	3268	0,17	0,000612
160	–//–	–//–	–//–	3472	0,16	0,000576
165	–//–	–//–	–//–	3704	0,15	0,00054
170	–//–	–//–	–//–	3968	0,14	0,000504
175	–//–	–//–	–//–	4274	0,13	0,000468
180	–//–	–//–	–//–	4630	0,12	0,000432
185	–//–	–//–	–//–	5051	0,11	0,000396
190	–//–	–//–	–//–	5556	0,1	0,00036
195	–//–	–//–	–//–	6173	0,09	0,000324
200	–//–	–//–	–//–	6945	0,08	0,000288
205	–//–	80	1,5	5952	0,07	0,000252
210	–//–	–//–	1	4630	0,06	0,000216
215	–//–	–//–	1,2	6667	0,05	0,00018

Таблица 4

Хвойный экстракт

Время, мин	Температура, °С	Напряжение, В	Сила тока, А	Плотность тока, А/м^2	Объем, м^3·10^3	Площадь электрода растворе, м^2
0	25	30	5,2	2889	0,5	0,0018
5	100	–//–	6	3333	0,5	0,0018
10	–//–	–//–	5,2	3073	0,47	0,001692
15	–//–	–//–	5,1	3080	0,46	0,001656
20	–//–	–//–	5,1	3148	0,45	0,00162
25	–//–	–//–	5,1	3373	0,42	0,001512
30	–//–	–//–	5	3387	0,41	0,001476
35	–//–	–//–	4,8	3333	0,4	0,00144
40	–//–	–//–	4,6	3276	0,39	0,001404
45	–//–	–//–	4,6	3454	0,37	0,001332
50	–//–	–//–	4,5	3472	0,36	0,001296
55	–//–	–//–	4,4	3595	0,34	0,001224
60	–//–	–//–	4,3	3620	0,33	0,001188
65	–//–	–//–	4,3	3733	0,32	0,001152
70	–//–	–//–	4,2	3764	0,31	0,001116
75	–//–	–//–	4,1	3796	0,3	0,00108
80	–//–	–//–	4	3968	0,28	0,001008
85	–//–	–//–	3,8	3909	0,27	0,000972
90	–//–	–//–	3,6	4000	0,25	0,0009
95	–//–	–//–	3,5	4051	0,24	0,000864
100	–//–	–//–	3,4	4106	0,23	0,000828
105	–//–	–//–	3,3	4167	0,22	0,000792
110	–//–	–//–	3,2	4233	0,21	0,000756
115	–//–	–//–	3	4167	0,2	0,00072
120	–//–	–//–	2,6	3611	0,19	0,000684
125	–//–	–//–	2,5	3858	0,18	0,000648
130	–//–	40	2,2	3595	0,17	0,000612
135	–//–	–//–	2,1	3646	0,16	0,000576
140	–//–	–//–	2	3704	0,15	0,00054
145	–//–	–//–	2,4	4762	0,14	0,000504
155	–//–	–//–	–//–	5128	0,13	0,000468
160	–//–	–//–	–//–	5556	0,12	0,000432
165	–//–	–//–	–//–	6061	0,11	0,000396
170	–//–	–//–	2	5556	0,1	0,00036
175	–//–	70	2,1	6481	0,09	0,000324
180	–//–	–//–	1,8	6250	0,08	0,000288
195	–//–	80	1,5	5952	0,07	0,000252
200	–//–	–//–	1	4630	0,06	0,000216
205	–//–	–//–	1,2	6667	0,05	0,00018

В целом динамика концентрирования носит линейный характер и может быть представлена линейной аппроксимацией (рис. 1–4).

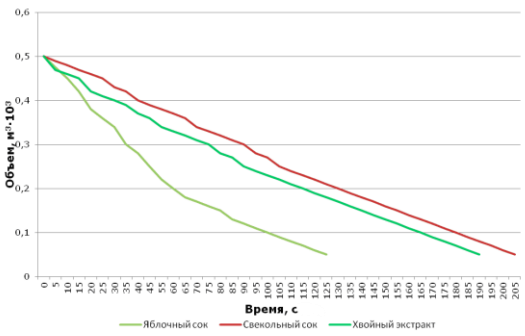

Рис. 1. Динамика изменения объема по времени

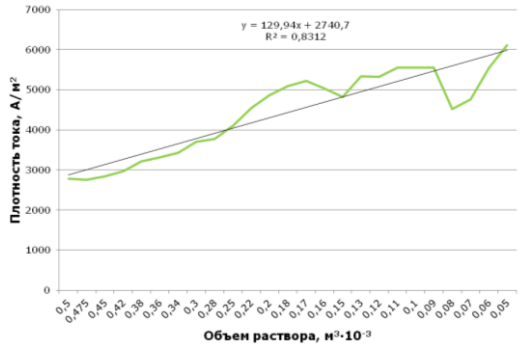

Рис. 2. Изменение плотности тока в растворе яблочного сока в зависимости от объема

Рис. 3. Изменение плотности тока в растворе свекольного сока в зависимости от объема

Рис. 4. Изменение плотности тока в растворе хвойного экстракта в зависимости от объема

Под действием электрического тока в среде электролита происходит электрохимическая коррозия электродов. Устойчивость электродов в случае применения прямого электронагрева – вопрос, требующий самостоятельного детального исследования. При проведении описанного эксперимента первично было оценено поведение электродов из стали марки 12Х18Н10Т путем определения массы сухих электродов до и после выпаривания.

Взвешивание (с точностью 0,1 мгм) электродов до и после проведения упаривания растворов не показало ни «минусовой», ни «плюсовой» коррозии.

Поверхность электродов приобрела из блестяще-матового, характерного для неполированной нержавеющей стали использованной марки, темный цвет. Цвет определялся налетом осадка, легко стираемого салфеткой. Увеличения налета в процессе выпаривания не наблюдалось. Состав, динамику и условия образования налета предстоит определить в дальнейших исследованиях.

Концентрированные натуральные соки подвергались восстановлению дистиллированной водой до содержания сухих веществ (справочного), характерного для натуральных соков. Восстановленный сок подвергался инспекции в сравнении с оригиналом в проходящем свете, в области спектра 315–980 нм, на фотоэлектрическом концентрационном колориметре КФК-2. Светофильтры и кюветы для исследования оптической плотности подбирались в зависимости от цветности соков согласно методике, прилагаемой к прибору (фильтры для свекольного сока – красный, для яблочного и хвойного – фиолетовый). Кроме того, при визуальной оценке методом ультрамикроскопии, основанным на явлении светорассеивания, установлено, что вопреки предположению визуально определяемое количество сгустков или частиц в упаренных прямым электронагревом соках снизилось, а также уменьшился средний размер оставшихся коагулятов по сравнению с определенным в исходном концентрате соков. Косвенно это свидетельствует о том, что прямой электронагрев не только не вызывает коагуляцию веществ в исследованных соках, но и оказывает диспергирующее действие.

Увеличение напряжения (120 минута табл. 2; 155, 205 минуты табл. 3; 130, 175, 195 минуты табл. 4) было вызвано необходимостью поддержания рассеиваемой мощности (для поддержания динамики процесса) в упариваемом растворе, так как значение силы тока падало по мере испарения воды. Наблюдаемые на графиках скачки плотности тока являются следствием ступенчатого увеличения напряжения.

Яблочный сок показал более интенсивный рост плотности тока в процессе уменьшения объема раствора, вероятно, вызванный большим количеством подвижных ионов макро- и микроэлементов в составе, нежели в свекольном соке или хвойном экстракте, и низкой общей вязкостью.

Однако в целом можно сделать вывод, что процесс омического нагрева соков требует автоматической корректировки тока и напряжения в случае вертикального размещения плоских электродов в растворе. Или же, что видится более целесообразным, необходимо провести исследования по размещению электродов в растворе таким образом, чтобы не изменять площади поверхности электродов вне зависимости от объема выпариваемого сока при периодическом ведении процесса.

Все из исследованных растворов имеют ярко выраженную склонность к пенообразованию при выпаривании. Применение прямого электронагрева показало возможность «мгновенного» прекращения пенообразования путем изменения подводимой мощности, что принципиально невозможно при передаче тепла к выпариваемому раствору через теплопередающую стенку ввиду значительной инерционности системы. Следовательно, выпарной аппарат с прямым электронагревом потенциально представляется легко автоматизируемым, в том числе с возможностью исключить потерю целевого продукта из-за пенообразования, а малая инерционность прямого нагрева позволяет избежать перегрева, приводящего к потере термолабильных составляющих соков.

Список литературы

1. Журавков, А. Аналитический обзор применения омического нагрева в пищевых технологиях // Сайт кафедры электротехники Национального университета пищевых технологий, Украина, 2010. – Web: www.oh.co.ua

2. Суханова, Р.С. Современные промышленные способы очистки картофеля // Агроголландия. – 1993. – № 3/4. – С. 9.

3. Сайт государственного агрикультурного центрального университета штата Луизиана, США. – Web: http://www.lsuagcenter.com/

4. Chen, P., Ruan, R., X. Ye, C. Doona, and I. Taub. Ohmic heating in the nutrition handbook for food processors. USA, 2001. University of Minessota.

5. Пьянков, А.Г. Исследование прямого электрического нагрева при упаривании растворов химически чистых сульфатов меди и никеля: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1979. – 145 с.

6. Пронович, А.С. Разработка процесса и аппаратуры с прямым электрическим нагревом для десорбции фтористого водорода из фторсернокислотных растворов: дис. ... канд. техн. наук. – Ставрополь, 1985. – 172 с.

7. Лейтес, И.Л. Теория и практика химической энерготехнологии / И.Л. Лейтес, М.Х. Сосна, В.П. Семенов. – М.: Химия, 1988. – 280 с.

8. А.с. 1353452 СССР, МКИ^4 В 01 Д1/10. Выпарной электродный аппарат (его варианты) / В.И. Косинцев, М.В. Храменкова, А.Г. Пьянков, В.П. Пищулин, В.Р. Риффель, А.С. Пронович. – 4 с.

9. Косинцев, В.И. Основы проектирования химических производств: учебник для вузов / В.И. Косинцев и др.; под ред. А.И. Михайличенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 332 с.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

A.M. Popov, N.V. Tihonov, I.N. Tihonova

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR JUICE CONCENTRATION AND STERILIZATION USING THE METHOD OF DIRECT HEATING

The article deals with the problem of juice concentration using the method of ohmic (direct) heating. Experimental studies on three varieties of juices have been conducted. It has been found that the concentration of juices through ohmic heating is inertialess, so the foaming process during ohmic heating of juices is easily controlled by adjusting a voltage. The process has also the ability to maintain the constant temperature of the solution eliminating overheating, coagulation, and it provides the BAS preservation. Electrode mass does not change during heating. The construction of the experimental unit for ohmic heating of juices having the coaxial arrangement of electrodes and the system of automation of the process parameters is planned on the basis of the analysis of the results obtained as well as on the use of the data available from other fields of application of ohmic heating of liquid media.

Direct heating, power expenses, evaporation, foaming.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru