УДК 664.68.292:633.877.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СУШКИ ПЛОДОВОГО СЫРЬЯ

Е.И. Мякинникова*, Г.И. Касьянов

*ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет»,
350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2*

**e-mail: elenamyakinnikova@mail.ru*

Дата поступления в редакцию: 28.10.2014
Дата принятия в печать: 13.03.2015

Актуальность проблемы производства сушеного плодового сырья при щадящих технологических режимах заключается в получении продуктов высокого качества, с максимально высоким содержанием биологически активных веществ исходного сырья. В связи с этим весьма перспективным является использование нетрадиционных для пищеконцентратной отрасли электрофизических и газожидкостных приемов интенсификации процесса сушки. В статье представлены результаты исследования процесса сушки растительного сырья путем его пропитки сжиженным диоксидом углерода при давлении выше атмосферного с последующим резким сбросом давления. Обезвоживание продукта осуществляется при непрерывном удалении влаги и обработке сырья низкочастотным электромагнитным полем. Целью разработанной технологии обезвоживания сырья растительного происхождения является получение сухих фруктовых продуктов более высокого качества при одновременном снижении энергозатрат. Описана оригинальная технология щадящей сушки плодового сырья под действием электромагнитного поля низкой частоты (ЭМП НЧ) в среде углекислого газа. Предложена конструкция установки для сушки плодов. Определена пищевая ценность продуктов сублимационной сушки, показавшая, что по органолептическим, физико-химическим показателям и усвояемости плоды, высушенные по новой технологии, представляют собой высококачественные изделия и пользуются спросом у населения. Техническим результатом нового способа является сокращение продолжительности сушки растительного сырья, более быстрое испарение влаги, снижение доли энергозатрат и уменьшение массы высушиваемого материала. Капиллярно-пористая структура плодового сырья и особенности химического состава предъявляют особые требования к организации процесса обезвоживания. В состав плодового сырья в большом количестве входят углеводы и в меньших количествах белки, липиды, органические кислоты, флавоноиды, витамины. В период сушки эти вещества претерпевают необратимые изменения, что снижает биологическую ценность готового продукта. Значительное содержание углеводов в тканях плодов определяет продолжительность процесса сушки. Нельзя использовать более высокую температуру для сокращения продолжительности сушки, так как это может привести к образованию оксиметилфурфурола и меланоидинов.

Сушка, плодовое сырье, сжиженный CO_2, низкочастотная электромагнитная обработка, газожидкостные технологии, себестоимость.

Введение

Питание является одним из важнейших факторов, определяющих здоровье населения. Правильное питание обеспечивает нормальный рост и развитие человека, способствует профилактике заболеваний, продлению жизни, повышению работоспособности и создает условия для адекватной адаптации людей к окружающей среде. У большинства населения России выявляются нарушения питания, обусловленные недостаточным потреблением витаминов, минеральных веществ, полноценных белков и нерациональным их соотношением.

Для организации полноценного питания врачи-гигиенисты рекомендуют включать в рационы питания плодовые и овощные продукты. Однако свежее плодовое сырье имеет ограниченный срок хранения, поэтому необходимо разработать щадящие способы сушки для производства продуктов длительного хранения.

Повышение качества сушеной плодовой продукции и снижение себестоимости ее производства за счет использования нетрадиционных технологических приемов позволяет отказаться от импорта такой продукции из стран, поддержавших санкции против Российской Федерации. Развитием научных основ обезвоживания сырья в России и за рубежом занимались известные ученые и специалисты [1, 4–8]. Многие технические решения вопросов интенсификации сушки растительного сырья являются объектами интеллектуальной собственности [2, 3]. Актуальность исследования заключается в разработке новых, прорывных технологий сушки плодового сырья под воздействием электромагнитного поля низкой частоты (ЭМП НЧ) и сушки плодов в среде инертного газа.

Целью разработанного способа обезвоживания сырья растительного происхождения является получение сухих фруктовых продуктов более высокого качества при снижении энергозатрат.

Объект и методы исследования

Капиллярно-пористая структура плодового сырья и особенности химического состава предъявляют особые требования к организации процесса обезвоживания. В состав плодового сырья в большом количестве входят углеводы и в меньших количествах белки, липиды, органические кислоты, флавоноиды, витамины. В период сушки эти вещества претерпевают необратимые изменения, что снижает биологическую ценность готового продукта.

В растительной клетке находятся водные растворы гидрофильных веществ и коллоидные растворы и эмульсии гидрофобных компонентов. Клеточная вода, как правило, распределяется в клетке неравномерно. Паренхимные ткани содержат больше воды, а покровные ткани и семена значительно в меньших количествах. Поэтому в подготовленном для сушки сырье влаги больше, чем в исходном сырье.

Значительное содержание углеводов в тканях плодов определяет продолжительность процесса сушки. Нецелесообразно использовать более высокую температуру для сокращения продолжительности сушки, так как это может привести к образованию оксиметилфурфурола и меланоидинов [8].

Сушка плодов во многом зависит от общего содержания влаги в продукте и вида связи влаги с материалом, которая зависит от величины свободной энергии изотермического обезвоживания. При этом необходимо выполнить работу, необходимую для удаления 1 моля воды при постоянной температуре без изменения состава вещества при данном влагосодержании. Можно определить количество энергии для удаления 1 кг/моль воды из сырых плодов [1] (уравнение 1):

$$A = -RxTxln\varphi, \quad (1)$$

где: A – энергия связи влаги, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, °С; φ – относительная влажность воздуха.

Если в плодах имеется свободная влага, то $A = 0$. Когда влага удаляется из клеток, тогда энергия связи А возрастает.

Представляет интерес определение удельной теплоемкости плодов, которая соответствует количеству тепла, поглощенного продуктом при нагревании на 1 °С или Кельвина, и выражается в кДж/(кг–°С). Удельную теплоёмкость c рассчитывали по формуле

$$c = Q / m\,\Delta T, \quad (2)$$

где, Q – количество тепла, полученное массой плода при нагреве; m – масса нагреваемого плода; ΔT – разность конечной и начальной температур вещества [1]. Необходимо также определить количество тепловой энергии, проходящее через единицу поверхности за единицу времени, т.е. коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Коэффициент температуропроводности определяли как отношение теплопроводности к объёмной теплоёмкости при постоянном давлении измеряется в м²/с:

$$\chi = \frac{\aleph}{c_p \rho}, \quad (3)$$

где χ – температуропроводность; $\aleph$ – теплопроводность; c_p – изобарная удельная теплоёмкость; ρ – плотность [4].

Авторы разработали способ интенсификации процесса обезвоживания подготовленного плодового сырья за счет его пропитки сжиженным углекислым газом при давлении выше атмосферного с последующим резким сбросом давления, сублимационной сушки сырья в среде углекислого газа и воздействии на сырье ЭМП НЧ с частотой 18–55 Гц.

Основным достоинством технологии, основанной на применении электромагнитных полей, являются: универсальность, что позволяет применять их в самых разнообразных технологических процессах. Экономичность процесса достигается благодаря прямому воздействию на объект без промежуточной утилизации энергии, а экологичность – за счет снижения и сокращения расхода химических реагентов [1, 2].

Поэтому разработка электромагнитных технологий, обеспечивающих эффективную переработку растительного сырья, сокращение потерь извлекаемого продукта, позволяет достичь высокого качества высушиваемой продукции, получить возможность создания новых видов продукции и высокопроизводительных, экологически чистых производств, осуществлять экономию материальных и энергетических ресурсов [3,4].

Результаты и их обсуждение

Важное значение при разработке режимов сушки имеет структура плодовой ткани, формы и энергия связи влаги с материалом, наличие термолабильных компонентов (витаминов и углеводов). При проведении исследований по определению показателей качества и безопасности плодового сырья и высушенных продуктов, были использованы общепринятые способы исследования органолептических, физико-химических и биохимических свойств. В табл.1 приведено содержание пищевых веществ в плодах на 100 г съедобной части. В экспериментах использовали плоды киви морозостойкого сорта «Хейворд», плоды манго сорта «Южный румянец», персики сорта «Ранний Кубани», хурма сорта «Россиянка» и фейхоа сорта «Бугристый».

Таблица 1

Химический состав выбранных для исследований плодов

Массовая доля, %	Массовая доля, %						Средняя масса плода, г
	Влага	Белок, N·6,25	Жир	Сахара	Витамин С, мг %	Органич. кислоты	
Киви	93,8	0,8	0,35	8,6	180,0	2,5	78
Манго	87,5	0,8	0,35	13,4	25,0	0,5	270
Персики	86,1	0,9	0,1	14,1	10,0	1,7	160
Хурма	81,5	0,5	0,4	16,1	25,0	0,1	102

Проанализировав полученные данные, приведенные в табл. 1, можно сделать вывод о том, что выбранное сырье обладает сравнительно высокой влажностью 93–81 %, содержит углеводы и витамин С, которых недостает в животном сырье.

Поставленные авторами задачи решаются тем, что в способе щадящей сушки растительного сырья, включающем пропитку сырья сжиженным диоксидом углерода при давлении выше атмосферного, организацию мгновенного сброса давления, сопровождающийся вскипанием сжиженного газа и охлаждением материала до температуры ниже температуры тройной точки воды, происходит сушка материала при непрерывном удалении образующейся влаги. Пропитку сырья и удаление влаги осуществляют в электромагнитном поле с частотой 18–55 Гц, при этом удаление влаги производят при температуре минус 35 °С.

Разработанный способ сушки растительного сырья иллюстрируется схемой установки для щадящей сушки плодов, представленной на рис. 1.

Разработанный авторами способ поясняется примером: мякоть хурмы (без косточек) массой 200 г и влажностью 84 % загружают в стакан, который помещают внутрь герметичного реактора и обрабатывают жидким CO_2 при давлении 4,2 МПа и температуре 22 °С в течение 10 мин.

Одновременно с пропиткой мякоти хурмы CO_2 включают генератор низкочастотных электромагнитных колебаний. После сброса давления в реакторе до атмосферного со скоростью 1 дм^3/с пюре замерзает до температуры минус 35 °С и его подвергают щадящей вакуумной сушке в электромагнитном поле низкой частоты.

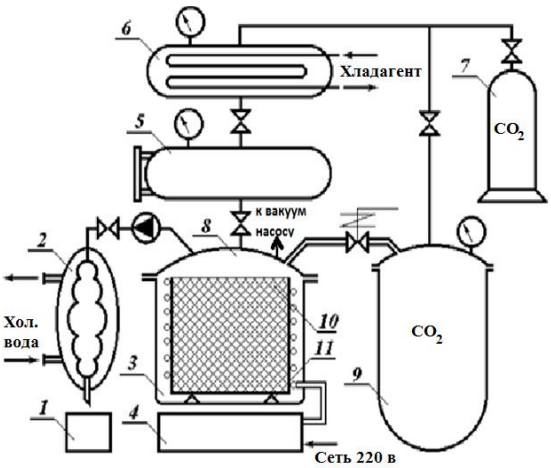

Рис. 1. Установка для щадящей сушки растительного сырья:
1 – сборник конденсата; 2 – водяной конденсатор; 3 – герметичный реактор; 4 – генератор низкочастотных электромагнитных колебаний; 5 – сборник жидкого CO_2; 6 – конденсатор паров CO_2; 7 – баллон, 8 – люк реактора; 9 – буферная емкость; 10 – сетчатая корзина с навеской сырья; 11 – весовое устройство

После сброса давления до атмосферного в реакторе 3 с замороженным сырьем за счет удаления паров CO_2 в буферную емкость 9 начинается процесс удаления влаги вначале через конденсатор 2, а затем с помощью вакуум-насоса.

Отличительной особенностью установки является возможность регенерации отработанного диоксида углерода, собранного в емкости 9, и ожижения его в конденсаторе 6 для последующего возврата в цикл замораживания.

На рис. 2 показана кривая сублимационной сушки пюре из плодов киви.

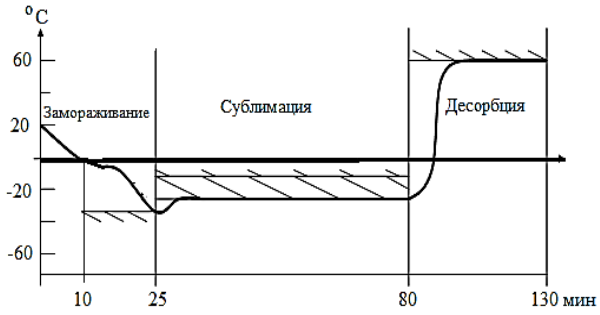

Рис. 2. Кривая сублимационной сушки пюре из плодов киви

Как видно из данных рис. 2, продолжительность обезвоживания пюре киви складывается из периода охлаждения продукта до 0 °С в течение 10 мин, замораживания продукта до минус 35 °С в течение 15 мин, процесса собственно сублимации и десорбции с общей продолжительностью 105 мин.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные по сушке пюре из плодов субтропических культур.

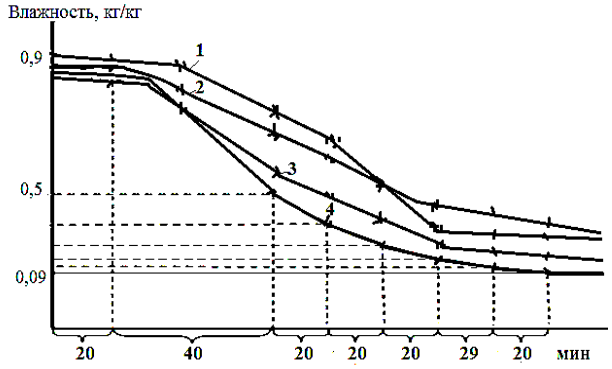

Рис. 3. Кривые сушки пюре из плодов субтропических культур:
1 – киви; 2 – манго; 3 – хурма; 4 – персики

Кривые сушки пюре из плодов наглядно показывают, что первоначальный период обработки сырья жидким диоксидом углерода имеет практически линейную скорость удаления влаги, а переход в режим сублимации позволяет удалять основную часть влаги. За счет применения ЭМП НЧ удалось интенсифицировать процесс удаления влаги из сырья практически в 1,6 раза.

Химический состав нарезанных на ломтики толщиной 5 мм высушенных плодов представлен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав высушенных плодов

Плоды	Массовая доля, %					
	Влага	Белок, N·6,25	Жир	Сахара	Витамин С, мг %	Органич.кислоты
Киви	14,5	14,1	2,95	33,1	49,2	0,77
Манго	14,1	1,5	0,75	35,1	37,4	0,72
Персики	18,0	3,0	0,41	36,1	36,6	2,48
Хурма	13,3	0,8	0,35	37,6	37,5	0,69

По требованиям технического регламента Таможенного союза высушенные плоды должны иметь товарный вид, не иметь повреждений, постороннего привкуса или запаха, значительных поверхностных пороков, пятен.

Представляет интерес определить изменение качественных показателей некоторых видов плодов субтропических культур под действием электромагнитного поля низкой частоты. Результаты проведения опытов представлены в табл. 3.

Экономическая эффективность от внедрения новой технологии сублимационной сушки субтропического сырья и производства на их основе специализированных продуктов питания определена с учетом общепринятых методов экологического обоснования с использованием разностного критерия превышения стоимостной оценки результатов над затратами и с учетом специфики продукта. Графическая структура себестоимости продуктов щадящей вакуумной сушки приведена на рис. 4, 5.

Таблица 3

Результаты обработки сырья ЭМП НЧ

Вид и сорт сырья	Показатель		
	Убыль массы, %	Оценка качества, баллы	Доля энергозатрат в себестоимости продукции, %
Хурма «Россиянка»	47,0	4,0	3,7
Фейхоа «Никитский»	55,0	4,6	4,1
Хурма «Помидорная»	54,0	4,5	3,9
Фейхоа «Бугристый»	54,5	4,5	4,0
Хурма «Медовая»	57,5	4,7	4,2
Фейхоа «Первенец»	49,0	4,1	3,8
Сушка хурмы «Россиянка» без обработки ЭМП	45	3,8	8,9

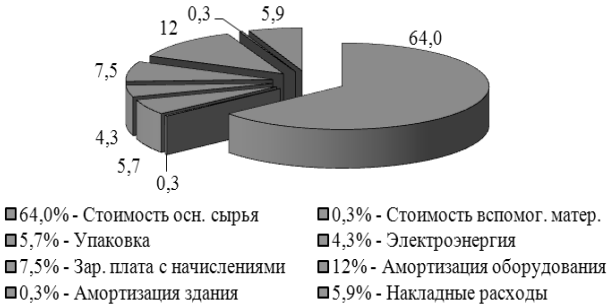

Рис. 4. Структура себестоимости пюре из фейхоа, высушенного способом щадящей сушки

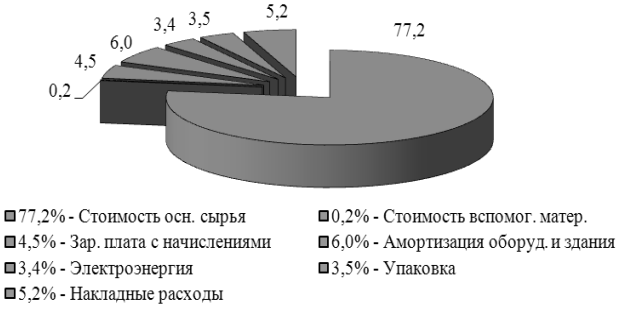

Рис. 5. Структура себестоимости пюре из хурмы, высушенной способом щадящей сушки

Как видно из приведенных диаграмм, основной вклад в себестоимость сухого пюре из фейхоа и хурмы вносит стоимость исходного сырья.

Выводы

Разработана оригинальная технология щадящей низкотемпературной сушки плодового сырья в среде диоксида углерода под воздействием ЭМП НЧ, что обеспечило более интенсивный перенос влаги из глубинных слоев к поверхности продукта. Предложена конструкция установки для сушки пюре из плодов субтропических культур с использованием газожидкостной технологии.

Определена пищевая ценность продуктов щадящей сушки с повышенным содержанием углеводов, витамина С и белков. Приведен химический состав сухих плодов киви, манго, персиков и хурмы. Определена структура себестоимости пюре из плодов фейхоа и хурмы, высушенных способом щадящей вакуумной сушки. Установлено, что основной вклад в себестоимость сухого пюре из фейхоа и хурмы вносит исходное сырье (от 64 до 77 %).

Использование газожидкостного и электромагнитного способа сушки позволяет сократить продолжительность обезвоживания плодового сырья, снизить долю энергозатрат и уменьшить массу высушиваемого материала.

Список литературы

1. Шевцов, А.А. Развитие научных основ энергосбережения в процессах сушки пищевого растительного сырья: теория, техника, способы производства и управления: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. – Воронеж, 1999. – 50 с.
2. Патент РФ № 2501308. МПК A 23 L 1/00. Способ производства пищевого продукта из плодового сырья / Мартиросян В.В. – № 2011119101/13; заявл. 13.05.2011; опубл. 20.12.2013.
3. Патент РФ № 2498625. МПК A 23 L 1/212. Способ производства пищевого продукта из манго / Квасенков О.И. – № 2012136282/13; заявл. 27.08.2012; опубл. 20.11.2013.
4. Новиков, В.В. Комбинированное действие слабых постоянного и переменного низкочастотного магнитных полей на ионные токи в водных растворах аминокислот / В.В. Новиков, М.Н. Жадин // Биофизика. 1994. – Т. 39. – Вып. 1. – С.45–49.
5. Абизов, Е.А. Разработка технологии сушки коры облепихи крушиновидной и лоха узколистного–источников алкалоидов группы индола / Актуальные проблемы инноваций с нетрадиционными природными ресурсами и создания функциональных продуктов: материалы IV Российской науч.-практ. конф.– М.: РАЕН, 2007.– С. 76.
6. Бахмутян, Н.В. Інтенсифікація процесу сушіння фруктово-ягідної сировини в завислому шарі: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Одеса. Спеціальність 05.18.12 –процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв.–2007. – 24 с.
7. Гришин, М.А. Математическое моделирование сушки в кипящем слое / М.А. Гришин, Н.В. Бахмутян // Проблемы промышленной теплотехники: тезисы докладов IV межд. конф, 30 сент. 2005 г. – Киев, 2005. – С. 208–209.
8. Drying of Foods, Vegetables and Fruits / V. Sachin Jangam, L. Chung, S. Arun Mujumdar. – 2010. – Vol. 1. – 146 p.

APPLICATION OF ELECTROPHYSICAL AND GAS-LIQUID TECHNOLOGIES FOR DRYING OF FRUIT RAW MATERIAL

E.I. Myakinnikova*, G.I. Kasyanov

Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya, Krasnodar, 350072, Russia

**e-mail: elenamyakinnikova@mail.ru*

Received: 28.10.2014
Accepted: 13.03.2015

The urgency of the problem of fruit raw materials drying under the controlled technological conditions consists in obtaining quality products with a high content of biologically active substances in these raw materials. In this regard, the use of physical methods of drying process intensification non-traditional for the food concentrates production is very promising. The article presents research results on the drying of plant raw materials by means of liquefied carbon dioxide impregnation under the pressure higher than the atmospheric one followed by sharp decompressed. Product dehydration is realized at continuous moisture removal and raw material treatment with low frequency electromagnetic field (LFEF). The purpose of this dehydration technique is to obtain fruit products of higher quality and at a lower cost. Original technique of freeze-drying of fruit raw material under the influence of LFEF in the carbon dioxide atmosphere has been described. The design of fruit drying installation has been suggested. The determined nutritional value of freeze-drying products has shown that digestibility, organoleptic and physical-chemical parameters of fruits dried by means of a new technology correspond to high-quality parameters and the products are popular with the population. The technical result of the new method is a shorter period of plant raw material drying, more rapid moisture evaporation, lower energy consumption and a smaller mass of the material dried. Capillary-porous structure of fruit raw material and the peculiarities of chemical composition impose special requirements to the organization of dehydration process. Fruit raw material contains a large amount of carbohydrates and lesser amounts of proteins, lipids, organic acids, flavonoids, vitamins. During drying, these substances undergo irreversible changes that reduce the biological value of the finished product. The considerable amount of carbohydrates in fruit tissue determines the duration of drying. It is impossible to use a higher temperature to shorten drying since this may lead to the formation of hydroxymethylfurfural and melanoidins.

Drying, fruit raw material, liquefied carbon dioxide, low frequency electromagnetic treatment, gas-liquid technologies, production cost.

References

1. Shevtsov A.A. *Razvitie nauchnykh osnov energosberezheniia v protsessakh sushki pishchevogo rastitel'nogo syr'ia: Teoriia, tekhnika, sposoby proizvodstva i upravleniia.* Avtoref. diss. dokt. tehn. nauk [Development of scientific bases of energy saving in processes of drying of food vegetable raw materials: Theory, equipment, ways of production and management. Dr. tech. sci. autoabstract diss.]. Voronezh, 1999. 50 p.
2. Martirosian V.V. *Sposob proizvodstva pishchevogo produkta iz plodovogo syr'ia* [Way of production of foodstuff from raw materials of the fruit]. Patent RF, no. 2501308, 2013.
3. Kvasenkov O.I. *Sposob proizvodstva pishchevogo produkta iz mango* [Way of production of foodstuff from mango]. Patent RF, no. 2498625, 2013.
4. Novikov V.V., Zhadin M.N. Kombinirovannoe deistvie slabykh postoiannogo i peremennogo nizkochastotnogo magnitnykh polei na ionnye toki v vodnykh rastvorakh aminokislot [Combined action of weak constant and variable low-frequency magnetic fields to ionic currents in aqueous solutions of amino acids]. *Biofizika* [Biophysics], 1994, vol. 39, no. 1, pp. 45-49.

5. Abizov E.A. Razrabotka tekhnologii sushki kory oblepikhi krushinovidnoi i lokha uzkolistnogo–istochnikov alkaloidov gruppy indola [Development of technology for drying bark of sea buckthorn and Elaeagnus angustifolia, source alkaloids of group indole]. *Trudy IV Rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy innovatsii s netraditsionnymi prirodnymi resursami i sozdaniia funktsional'nykh produktov»* [Proc. of the IV of the Russian scientific and practical conference «Actual Problems of Innovations with Nonconventional Natural Resources and Creations of Functional Products»], Moscow, 2007, 76 p.

6. Bakhmutian N. V. *Інтенсифікація процесу сушіння фруктово-ягідної сировини в завислому шарі*. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук [Intensification of process of drying of fruit and berry raw materials in the weighed layer. Cand. tech. sci. autoabstract diss.], Odessa, 2007. 24 p.

7. Grishin M.A., Bakhmutian N.V. Matematicheskoe modelirovanie sushki v kipiashchem sloe [Mathematical modeling of drying in a boiling layer]. *Trudy IV mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy promyshlennoi teplotekhniki»* [Proc. of the IV International Conference «Problems of Industrial Heat Engineering»], Kiev, 2005, pp. 208-209.

8. Jangam S.V., Law C.L., Mujumdar A.S. *Drying of Foods, Vegetables and Fruits. Vol. 1.* Singapore, 2010. 146 p.

Дополнительная информация / Additional Information

Мякинникова, Е.И. Использование электрофизических и газожидкостных технологий для сушки плодового сырья / Е.И. Мякинникова, Г.И. Касьянов // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – Т. 37. – № 2. – С. 48–53.

Myakinnikova E.I., Kasyanov G.I. Application of electrophysical and gas-liquid technologies for drying of fruit raw material. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2015, vol. 37, no. 2, pp. 48–53. (In Russ.)

Мякинникова Елена Исааковна
канд. техн. наук, докторант кафедры технологии мясных и рыбных продуктов, ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2, тел.: +7 (861) 255-99-07, e-mail: elenamyakinnikova@mail.ru

Касьянов Геннадий Иванович
д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии мясных и рыбных продуктов, ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2, тел.: +7 (861) 255-99-07, e-mail: kasyanov@kubstu.ru

Elena I. Myakinnikova
Cand. Tech. Sci., Doctoral Student of the Department of Meat and Fish Products Technology, Kuban State University of Technology, 2, Moskovskaya Str. Krasnodar, 350072, Russia, phone: +7 (861) 255-99-07, e-mail: elenamyakinnikova@mail.ru

Gennadiy I. Kasyanov
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Meat and Fish Products Technology, Kuban State University of Technology, 2, Moskovskaya Str. Krasnodar, 350072, Russia, phone: +7 (861) 255-99-07, e-mail: kasyanov@kubstu.ru

УДК 637.073:532.135

ЗАВИСИМОСТЬ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ СЫЧУЖНЫХ ГЕЛЕЙ ОТ КОНЦЕНТРАЦИЙ МОЛОЧНОГО ЖИРА И СУХИХ ВЕЩЕСТВ

А.М. Осинцев*, В.И. Брагинский, Д.С. Бабурчин, В.В. Рынк

ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

**e-mail: osintsev@kemtipp.ru*

Дата поступления в редакцию: 21.04.2015
Дата принятия в печать: 24.04.2015

С технологической точки зрения исследование коагуляции молока, содержащего близкое к естественному количество жира, является актуальной задачей. В данной работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса флокуляции и гелеобразования в восстановленном модельном молоке, содержащем различное количество казеина (2,5 и 5 % по массе) и жира (0, 2,5 и 5 % по массе). Экспериментальное исследование вязкоупругих свойств формирующихся сгустков проводилось с помощью динамического реометра собственной конструкции, отличающегося возвратно-поступательным перемещением кюветы относительно неподвижного зонда. Разработана упрощенная кинетическая модель процесса формирования сгустка. Флокуляционная стадия этого процесса описывается как рост фрактальных агрегатов размерностью D = 2,22. В этом случае средний размер агрегатов растет быстрее, чем расстояние между ними, и, если исходная концентрация мицелл казеина достаточна, система достигает стадии перколяции, т.е. образования сплошной среды – геля. Далее происходит упрочнение сгустка за счет образования дополнительных связей. На основе сформулированной модели объяснено наличие минимальной концентрации мицелл для гелеобразования. Предложено возможное объяснение пропорциональности модуля упругости и модуля потерь для сетки геля. Установлено, что уменьшение концентрации мицелл ведет к снижению числа дополнительных связей в единице объема на стадии формирования сгустка и пропорциональному снижению его прочности. Например, при любой концентрации жира прочность сгустка, в котором исходная концентрация мицелл вдвое