

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КАКТУСОВ СЕМЕЙСТВА *OPUNTIA*

© 2008 г. **L. Ponce***, Ph.D.; **T. Flores***, M.S.; **M. Arronte***, Ph.D.; **В. А. Парфенов****, канд. техн. наук; **Л. В. Ковальчук*****, канд. физ.-мат. наук; **L. Bartoli******, Ph.D.

* National Politechnique Institute – CICATA, Мексика

** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Санкт-Петербург

*** ЗАО “Лазерная физика”, Санкт-Петербург

**** Istituto di Fisica Applicata, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Италия

Предложен новый оригинальный метод лазерной обработки кактусов семейства *Opuntia Ficus Indica (Nopal)*, используемых для производства продуктов питания в пищевой промышленности. В статье описаны результаты экспериментов по удалению шипов и игл с поверхности кактусов методом импульсной лазерной абляции и обсуждаются проблемы разработки промышленной технологии на его основе.

Коды OCIS: 350.3390.

Поступила в редакцию 27.12.2007.

Введение

В последние годы наблюдается заметный интерес к использованию лазерных технологий в пищевой промышленности. К подобным нетрадиционным применениям лазеров относятся лазерная маркировка овощей и фруктов, сыров, куриных яиц, пластиковых упаковок продуктов питания и напитков [1, 2], резка посевного картофеля [3] и фигурная нарезка сыра [4], сортировка риса [1], очистка орехов от скорлупы [5], контроль качества и содержание сахара в яблоках и других фруктах [6], контроль качества мясных продуктов, хлебной выпечки и пива в процессе его производства [7, 8] и др.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности применения лазерных технологий для обработки нопалитоса – кактуса семейства *Opuntia Ficus Indica (Nopal)*, произрастающего в Мексике, Бразилии, Южной Африке, Индии, Италии, на Мальте и в ряде других стран.

Молодые и сочные листья этого кактуса являются традиционным пищевым продуктом во многих странах мира. К примеру, в Мексике их используют для приготовления различных овощных блюд и напитков, начиная еще с античных времен. Помимо листьев, предметом гастрономического спроса являются также и плоды нопалитоса. В ряде стран, например, на Мальте и в Италии их относят к разряду экзотических фруктов, известных под названием *Prickly pear* (“колючая груша”), где их употребляют в пищу в сыром виде и используют для производства алкогольных напитков. Заметим также, что нопалитосы ценятся не только из-за высоких вкусовых качеств [9]. Благодаря своим лечебным свойствам они находят применение в те-

рапии и при изготовлении лекарственных препаратов [10].

Листья нопалитоса представляют собой плоские (толщиной около 1–2 см) продолговатые “пластины” овальной формы и имеют ярко-зеленую окраску, в то время как плоды этого кактуса напоминают по форме грушу светло-желтого, розового или красного цвета. Поверхность листьев и плодов нопалитоса усеяна колючими бугристыми наростами, которые содержат шипы и иглы и называются “ореолами”. В отличие от тонких (диаметром около 100–200 мкм) остроконечных игл, шипы кактуса представляют собой более жесткие, твердые и крупные (диаметром до 1 мм) образования из натуральной кристаллической целлюлозы [11] (см. рис. 1 и 2). Таким образом, поверхность нопалитоса по-



Рис. 1. Листья и плоды нопалитоса.

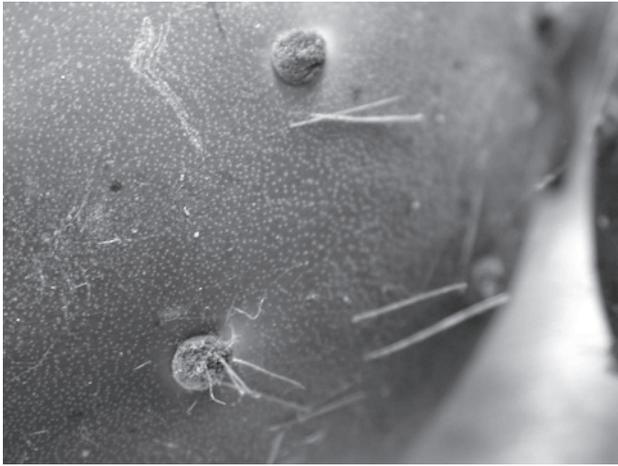


Рис. 2. Характерные “ореолы” на поверхности плода нопалитоса.

крыта множественными “колючками”, которые при контакте с руками и другими открытыми участками человеческого тела могут причинять болезненные уколы и очень трудно удаляются из кожи [12]. По этой причине перед употреблением кактуса в пищу необходимо очень тщательно удалять с его поверхности даже самые мелкие шипы и иглы.

В настоящее время удаление “ореолов” производится методом механической обработки. Чаще всего эта операция осуществляется с помощью режущего инструмента (как правило, “вручную”). Производительность этого процесса очень низкая и сопровождается существенными (до 30%) потерями “полезного веса” кактуса [11]. Кроме того, при такой обработке повреждается мякоть стеблей и плодов растения, что заметно сокращает сроки их хранения в свежем виде.

Все перечисленные проблемы характерны также и для переработки ряда других овощей и фруктов, например, ананасов. По этой причине создание новых технологий обработки продуктов питания растительного происхождения является актуальной задачей в современной пищевой индустрии.

В данной статье описывается новый оригинальный метод обработки кактусов, основанный на использовании импульсных лазеров и свободный от недостатков, присущих традиционным технологиям. Ниже приводится описание разработанного метода и обсуждаются полученные результаты.

Описание метода. Основные результаты работы

В данной работе для обработки кактуса было предложено использовать метод импульсной лазерной абляции. Для проверки возможности удаления

шипов и игл с поверхности кактуса под воздействием высокоинтенсивного лазерного излучения в экспериментах использовались образцы листьев нопалитоса, произрастающего в центральной Мексике, а также плоды этого же вида кактуса из южных провинций Италии (регион Кампанья).

На начальном этапе работы проводился выбор лазера, пригодного для обработки кактуса. Для этого были исследованы спектры отражения и поглощения наружных покровов нопалитоса, показавшие, что “ореолы” имеют высокое поглощение как в видимой части спектра, так и в ближнем ИК диапазоне (с максимумами вблизи длин волн 550 и 1000 нм), за исключением области 650–700 нм, что типично для большинства растений, содержащих хлорофил (см. рис. 3). В то же время “кожа” нопалитоса имеет минимальное поглощение в области 800–1100 нм (см. рис. 3 и рис. 4, на котором показан спектр поглощения листа другого растения из того же семейства кактусов).

Проведенные измерения спектра кактуса позволяют сделать вывод о возможности его обработки с помощью Nd:YAG-лазера. Дело в том, что поскольку

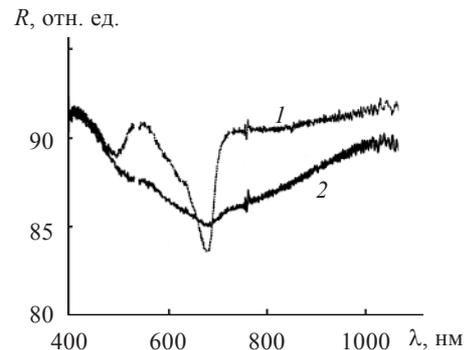


Рис. 3. Спектр отражения R листа нопалитоса. 1 – шипы и иглы, 2 – “кожа” растения.

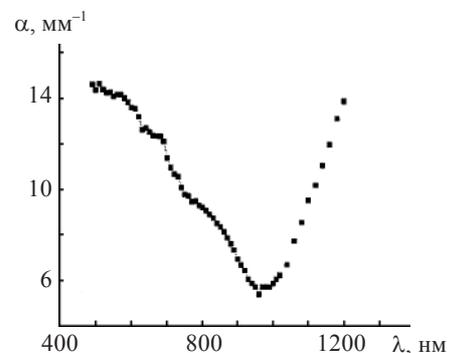


Рис. 4. Спектр поглощения α “кожи” листа нопалитоса.

ку длины волн основной (1,06 мкм) и второй (0,53 мкм) гармоник излучения данного лазера хорошо коррелируют со спектром поглощения “ореолов” и спектром отражения “кожи” нопалитоса, можно обеспечить селективное удаление “ореолов” с поверхности кактуса без повреждения “кожи” растения. Это очень важно с практической точки зрения, так как Nd:YAG-лазеры давно освоены промышленностью и широко представлены на рынке. Это позволяет решить поставленную задачу без разработки специализированной лазерной установки, а использовать коммерческие модели лазеров.

Для проверки справедливости данного вывода в экспериментах был использован имевшийся у авторов набор импульсно-периодических Nd:YAG-лазеров с выходными параметрами, приведенными в таблице.

Для удаления “ореолов” лазерный пучок фокусировался на поверхности кактуса таким образом, чтобы его диаметр был приблизительно равен диаметру “ореола” (около 4 мм). В результате абляции вещества, из которого состоят шипы и иглы, под воздействием лазерного излучения происходило эффективное удаление “ореолов” с поверхности стеблей и плодов растения. На их месте образовывались небольшие “кратеры” глубиной 1–2 мм. При этом каких-либо нарушений наружных покровов растения в экспериментах выявлено не было. На рис. 5 показан характерный вид “кратера” на поверхности плода нопалитоса.

Заметим, что эффект абляции отмечался при использовании всех указанных типов лазеров. Единственное отличие для разных лазеров состояло лишь в длительности процесса удаления отдельного “ореола”. Так, например, среднее время, требовавшееся для удаления “ореола” с помощью лазера SOLAR LS LQ129, составляло около 1 с (на обеих длинах волн) и около 15–17 с для лазера Smart-Clean-II.

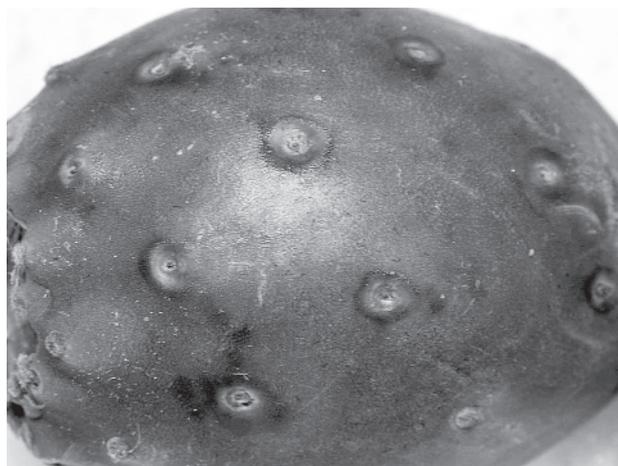


Рис. 5. Поверхность плода нопалитоса с характерными “кратерами”, образовавшимися на месте “ореолов” под воздействием Nd:YAG-лазера.

С целью более тщательного исследования процесса абляции и факторов, влияющих на его эффективность, в ходе работы были проведены дополнительные эксперименты с использованием метода эмиссионного спектрального анализа (известного также как метод спектроскопии лазерной искры). В настоящее время этот метод широко используется для элементного анализа газов, жидкостей и твердых тел и не требует большого количества анализируемого вещества. При этом сам спектральный анализ может проводиться в режиме реального времени [13–16].

В наших экспериментах были использованы специально приготовленные образцы, представляющие собой “кубики” одинакового размера, вырезанные из листьев кактуса и содержащие один-единственный “ореол” двух различных типов: с одиночным шипом и с множественными мелкими иглами.

Выходные параметры импульсно-периодических Nd:YAG-лазеров, использованных в эксперименте

Тип лазера		Выходные параметры				
Серия	Страна-изготовитель	Режим работы	Длина волны λ , мкм	Энергия импульса E , Дж	Длительность импульса τ , мкс	Частота повторения импульсов f , Гц
Smart Clean-II	Италия, El. En. S.p.a.	Свободная генерация	1,06	0,7	110	10
Лабораторный макет	Мексика	Свободная генерация	1,06	0,3	150	30
SOLAR LS LQ129	Белоруссия, SOLAR	Модулированная добротность	1,06 0,53	80×10^{-3} 40×10^{-3}	12×10^{-3}	50
HY-1200	Великобритания, Lumonics Inc.	Модулированная добротность	0,53 1,06	0,2 0,8	30×10^{-3}	10

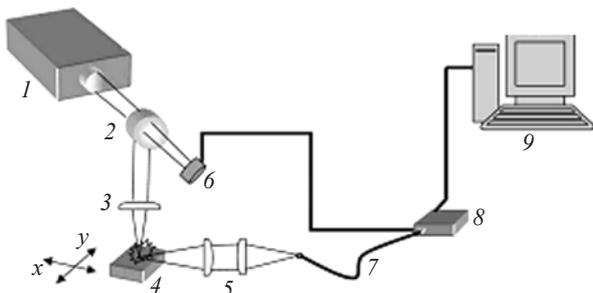


Рис. 6. Упрощенная оптическая схема экспериментальной установки для эмиссионного спектроскопического анализа пламени плазмы в процессе обработки нопалитоса. 1 – Nd:YAG-лазер, 2 – зеркало, 3 – фокусирующая линза, 4 – двухкоординатный транслятор, 5 – линзовая система, 6 – синхротранслятор, 7 – оптический кабель, 8 – спектрометр Ocean Optics USB2000VIS/NIR, 9 – персональный компьютер.

Лазерная искра на поверхности образцов создавалась с помощью Nd:YAG-лазера, работающего в режиме свободной генерации со следующими выходными параметрами: $\lambda = 1,06$ мкм, $E = 1,2$ Дж, $\tau = 120$ мкс. Частота повторения лазерных импульсов составляла $f = 2$ Гц, что позволяло без труда обрабатывать данные измерений с помощью персонального компьютера.

Упрощенная оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 6. Луч лазера 1 направлялся на поверхность образцов кактуса с помощью 45°-го интерференционного зеркала 2 и фокусирующей линзы 3, перемещение которой в вертикальной плоскости позволяло изменять положение фокального пятна относительно поверхности образца. Сами образцы устанавливались на 2-координатный транслятор 4, с помощью которого они могли перемещаться в горизонтальной плоскости для точного “нацеливания” лазерного пучка на “ореол”.

В ходе экспериментов было выявлено три различных стадии образования плазмы: начало процесса (область пламени локализована вблизи поверхности “ореола”), развитие плазмы (пламя – на расстоянии 2–7 мм от поверхности “ореола”) и диссипация плазмы (пламя – на расстоянии более 7 мм от “ореола”). Спектр, зарегистрированный на первой стадии образования плазмы, в основном соответствовал спектру непрерывной эмиссии вещества, содержащегося в шипах и иглах. На второй стадии в спектре преобладали линии молекулярных переходов, а на третьей стадии отмечались только слабые эмиссионные переходы, не содержащие спектральных линий непрерывной электронной эмиссии.

При анализе спектра эмиссии плазмы для изучения ее различных стадий в экспериментах изменялось положение области фокусировки лазерного пучка в вертикальной плоскости. При этом анализируемая часть облачка плазмы имела следующие характерные размеры: диаметр 1 мм и длина около 2 мм. Для регистрации спектра плазмы использовался спектрометр Ocean Optics USB 2000 VIS/NIR с ПЗС-камерой (число пикселей – 2048), позволяющий проводить измерения в диапазоне длин волн 350–1100 нм. Анализируемое излучение вводилось в спектрометр с помощью светособирающего оптоволоконного жгута (диаметр сердцевины каждого из волокон составлял 600 мкм) со специальным объективом из двух ахроматических линз.

В ходе работы были проведены дополнительные эксперименты по сравнению эффективности процесса абляции шипов и игл в различных газовых средах – на открытом воздухе и в азотной среде. В последнем случае использовалась специальная проточная газовая камера с поддувом азота и прозрачным стеклянным окном, через которое излучение лазера направлялось на поверхность помещенных внутрь камеры образцов кактуса.

Оказалось, что в отсутствие кислорода эффективность процесса удаления “ореолов” значительно уменьшается (см. рис. 7). Это позволяет сделать вывод, что при лазерной обработке происходит не только испарение, но и горение вещества, из которого образованы шипы и иглы. Следовательно, для увеличения эффективности удаления “ореолов” при лазерной обработке целесообразно использовать поддув кислорода.

Поскольку в экспериментах удаление “ореолов” с поверхности листьев и плодов нопалитоса достигалось при работе с лазерами, которые существенно различались между собой по своим параметрам, важно было выбрать лазер с оптимальными выходными характеристиками. Под оптимизацией выходных параметров лазера подразумевался выбор таких режимов обработки кактуса, которые обеспечивают максимальную скорость удаления шипов и игл, но в то же время исключают возможность повреждения “кожи” растения в областях, которые не содержат “ореолов”.

В результате экспериментальной проверки был определен порог (минимальный уровень) энергии импульсов лазерного излучения, необходимой для удаления “ореолов”. При использовании Nd:YAG-лазера с $\lambda = 1064$ нм он составляет 80 мДж при $\tau = 180$ мкс и фокусировке лазерного пучка в пятно диаметром 4 мм (характерный размер “ореола” на поверхности кактуса). При этом максимальная эффективность удаления шипов и игл может быть

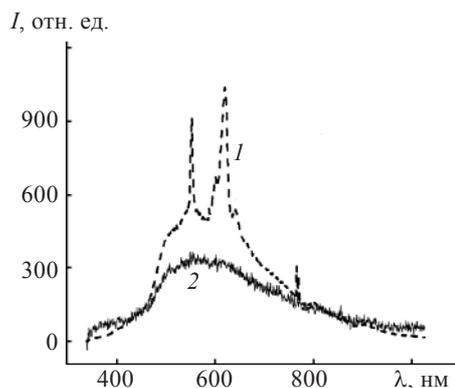


Рис. 7. Спектр эмиссии плазмы *I* в различных газовых средах. 1 – открытый воздух, 2 – азот.

обеспечена при использовании лазера с энергией излучения на уровне 0,5–0,7 Дж при 110–150 мкс и 10 Гц.

Обсуждение результатов и заключение

В рамках данной работы предложен и экспериментально проверен новый оригинальный метод лазерной обработки ценного пищевого продукта – кактуса семейства *Opuntia Ficus Indica (Nopal)*. Предложенный метод основан на использовании процессов импульсной лазерной абляции и позволяет эффективно удалять шипы и иглы с поверхности листьев и плодов кактуса без повреждения наружных покровов и внутренней структуры данного растения. Для этой цели могут быть использованы импульсно-периодические Nd:YAG-лазеры, генерирующие излучение на длинах волн 1,06 и 0,53 мкм.

По сравнению с традиционными механическими методами обработки кактусов данного семейства, метод лазерной абляции имеет целый ряд преимуществ:

- 1) полное удаление шипов и игл без повреждения наружных покровов растения;
- 2) отсутствие механического контакта кактуса с инструментом (и, как следствие, отсутствие риска бактериологического заражения обработанного продукта, а следовательно, возможность его длительного хранения в свежем виде);
- 3) после лазерной обработки кактуса не требуется его дополнительная химическая обработка;
- 4) существенное снижение отходов процесса обработки.

В подтверждение сказанного можно привести следующие сравнительные данные. Производительность широко используемой во многих странах (например, в Мексике) “ручной” механической обра-

ботки кактусов составляет около 10–15 кг/ч. В ходе наших предварительных экспериментов было показано, что лазерная обработка позволяет увеличить производительность до 100 кг/ч. В то же время, по нашим предварительным оценкам, использование автоматизированной системы наведения лазерного пучка (см. комментарии ниже) позволит еще более повысить производительность процесса обработки (до 180–200 кг/ч).

Полученные в данной работе результаты позволяют рекомендовать метод лазерной абляции для практического использования на предприятиях пищевой промышленности, специализирующихся на производстве продуктов питания из кактусов. Вместе с тем полученные результаты следует рассматривать как предварительные, поскольку для промышленного использования предложенного метода необходимо разработать соответствующую технологию.

Одной из самых сложных научно-технических проблем, которые должны быть решены в ходе дальнейшей работы, является разработка специальной системы наведения лазерного пучка на “мишень” (т. е. на “ореолы”, содержащие шипы и иглы) в процессе обработки поверхности кактуса.

Необходимость разработки такой системы вполне очевидна. Конечно, удаление “ореолов” с поверхности кактуса может производиться и без какого бы то ни было специального “нацеливания” лазера, а просто путем непрерывного сканирования лазерного пучка по всей поверхности листьев растения. В принципе это возможно, так как благодаря высокому коэффициенту отражения наружных покровов кактуса (в зонах, не содержащих шипы и иглы) на длине волны генерации Nd:YAG-лазера (1064 нм) такое сканирование не должно приводить к повреждению участков “кожи”, свободных от “ореолов”. Однако такой подход малоэффективен с экономической точки зрения и не позволяет гарантировать “бестравматичную” обработку поверхности кактуса.

С точки зрения увеличения производительности процесса обработки, более целесообразно использовать метод высокоточного “нацеливания” лазерного пучка, который может быть основан, например, на применении оптической системы распознавания образов [17, 18]. Принцип работы подобных систем основан на сканировании изображения наблюдаемого объекта и его сравнении с “реперным образом”, в качестве которого в нашем случае может выступать изображение “ореола” кактуса.

Система наведения, работающая на таком принципе, должна определять местоположение распознанных “ореолов” на поверхности кактуса и

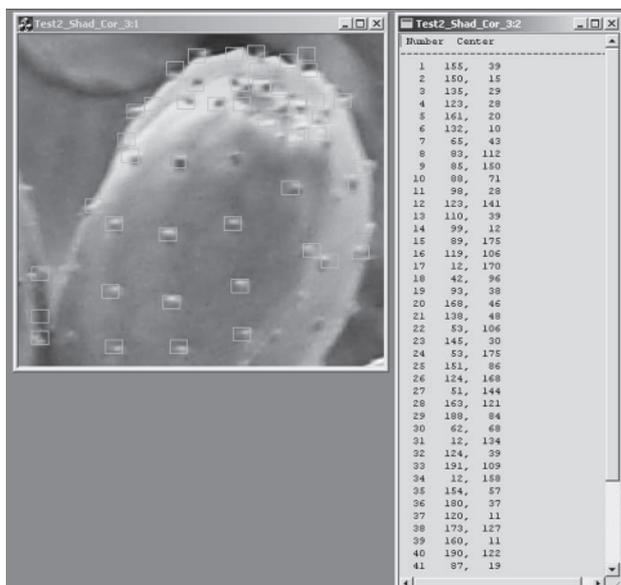


Рис. 8. Результат обнаружения “ореолов” (как объектов для целеуказания) в виде таблицы, включающей координаты местоположения всех распознанных объектов (центров стробов).

проводить точное нацеливание лазерного пучка на “ореол” с помощью высокоскоростного гальванометрического сканера. Только после этого должна выдаваться команда на запуск импульсов лазерного излучения.

В данной работе были проведены эксперименты по численному моделированию, которые подтвердили возможность реализации такой системы. В нашем случае объект для целеуказания (“ореол”) задавался в виде эталонного изображения, хранящегося в базе данных. Этот эталон формируется произвольным образом в виде содержащего заданный объект фрагмента, выбираемого на исходном изображении листа кактуса. Целеуказание на заданный объект для наведения лазерного луча осуществляется с помощью электронного устройства на основе специализированного процессора, реализующего заданный алгоритм.

Этот алгоритм прежде всего включает в себя предварительный поиск (локализацию) на исходном полутоновом изображении местонахождения заданного объекта. Затем происходит автоматическое распознавание искомых объектов по заданной степени близости к порогу корреляции. Выбор этого порога зависит от многих факторов и определяется экспериментальным путем, а сам результат распознавания представляется в виде строки, описывающей распознанный объект (см. рис. 8). И, наконец, вычисляются координаты местоположения всех рас-

познанных объектов, а именно координаты центров стробов, описывающих эти объекты.

На рис. 8 координаты распознанных объектов сведены в таблицу. Порядок вывода координат можно осуществлять произвольным образом, например, в соответствии со строчной разверткой. После этого должна выдаваться команда на запуск импульсов лазерного излучения.

Разработке системы “нацеливания” подобного типа и созданию промышленной технологической установки для лазерной обработки кактусов будут посвящены дальнейшие исследования авторов данной работы.

В заключение авторы выражают благодарность **В.В. Тетерину** за помощь в моделировании системы целеуказания, а также **Л.Н. Сомсу** за полезные обсуждения. Благодарим также **Ю.Н. Ефимова**, принимавшего участие в экспериментах. Часть исследований в рамках данной работы была выполнена при финансовой поддержке FONDO MIXTO CONACyT-Gobierno del Estado de Tamaulipas (Мексика).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Salvadeo P.* Il laser nel segmento agro-food // Applicazioni Laser. 2005. № 3. P. 32–35.
2. *Kincade K.* Laser coding turns food packages into miniature billboards // Laser Focus World. 2004. № 10. P. 85–91.
3. *Zelinski W.J., Tallackson Th.K.* Laser operated seed potato cutter // US Patent № 6321484. 2001.
4. *Graydon O.* Lasers turn cheese into art. – <http://optics.org/articles/news/9/12/1/1>
5. *Patel Ch.K.N.* Method for shelling of nuts with a laser beam // US Patent № 358467. 1980.
6. *Hogan H.* Testing apples without taking a bite // Photonics Spectra. 2005. № 7. P. 33.
7. *Hogan H.* Machine vision checks chicken and confirms cookies // Photonics Spectra. 2005. № 10. P. 84–89.
8. Optics & Lasers Europe. 2004. P. 13.
9. *Villarreal F., Rojas P., Arellano V., Moreno J.* Estudio quimico de nopales (Opuntia spp.) // Ciencia Mexicana. 1963. V. 22. P. 59–65.
10. *Goycoolea F.M., Cardenas A.*, Pectins from Opuntia spp.: A short review // J. of the Professional Association of Cactus Development. 2003. V. 5. P. 17–29.
11. *Von der Linde D., Schuller H.* Breakdown threshold and plasma formation in femtosecond laser-solid interaction // JOSA B. 1996. V. 13. P. 216–220.
12. *Srinivasan R.* Pulsed ultraviolet laser interactions with organic polymers – dependence of mechanism upon laser power // Polymer Degradation and Stability. 1994. V. 43. № 1. P. 101–107.

13. *Fichet P., Menat D., Brennetot R., Vors E., Rivoallan F.* Analysis by laser-induced breakdown spectroscopy of complex solids, liquids and powders with an echelle spectrometer // *Appl. Opt.* 2003. V. 42. № 30. P. 6029–6035.
 14. *Laser Induced Plasma and Application* / Ed. by Radziemski L.J., Cremers D.A. New York: Marcel Dekker, 1989.
 15. *Yueh F.Y., Singh J.P., Zhang H.* Laser-induced breakdown spectroscopy elemental analysis // *Encyclopedia of Analytical Chemistry* / Ed. by Meyers R.A. New York: Wiley, 2000. P. 2066–2087.
 16. *Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Рупасов А.А.* Диагностика плотной плазмы. М.: Наука, 1989. 368 с.
 17. *Glumov N.I., Kolomiyetz E.I., Sergeyev V.V.* Detection of objects on the image using a sliding mode // *Optics and Laser Technology.* 1995. V. 27. № 4. P. 241–249.
 18. *Burton M., Benning C.* Comparison of imaging infrared detection algorithms // *Proc. SPIE.* 1981. V. 302. P. 26–30.
-