

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ

В.В. КОТЕЛЬНИКОВ, Ю.П. МАЧЕХИН

В статье обсуждаются механизмы и особенности взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями, в состав которых входят меланин или хитин. Приведена математическая модель основных теплофизических процессов, возникающих в биологической ткани под воздействием лазерного излучения.

Ключевые слова: лазерное излучение, хитиновая ткань, меланин, СВЧ, вредные насекомые, тепловое воздействие.

ВВЕДЕНИЕ

Современные лазерные технологии находят применение и развиваются во всех сферах жизнедеятельности человека: от высокоточной хирургии до резки металла. Большое значение имеет то, что взаимодействие лазерного излучения возможно как с металлическими, диэлектрическими так и биологическими средами. Для обработки металлических материалов существует множество технологических решений с использованием как непрерывных, так и импульсных лазеров [1]. Что касается биологических сред, то наиболее развито применение лазеров для медицинских целей, остальные области требуют дальнейшего изучения [2]. К таковым можно отнести борьбу с вредными насекомыми, которые в определенных условиях не выдерживают лазерного излучения.

В первую очередь, необходимо установить поглощающие спектральные компоненты для лазерного излучения. Под поставленную спектральную задачу необходимо подобрать необходимые лазеры. Третья задача связана с определением условий воздействия лазерного излучения на биологические ткани и установлением теплофизических процессов в них.

Целью настоящей работы было обзор и выявление нехимических методов борьбы с вредными насекомыми; исследование взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями, содержащими меланин, как наиболее оптимального метода для защиты зерновых от вредных насекомых; поиск математической модели для описания теплофизических процессов в биологических тканях.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблема заключается в выборе способа активного воздействия на посевы. Вредные насекомые, например, саранча, уничтожают сельскохозяйственные посевы и угодья, и являются переносчиками возбудителей заразных болезней как для человека, так и для многих видов растений. Ошибочным является утверждение, что применение химических средств борьбы с вредителями является наиболее эффективным. Большинство из насекомых вырабатывают иммунитет, а ряд инсектицидов к тому же вредно воз-

действует на самого человека. Поэтому актуальным является поиск альтернативных методов борьбы с вредителями [3].

Известны результаты исследований, которые объясняют условия уничтожения насекомых не химическими способами, а с помощью электромагнитного излучения. Применение метода СВЧ обработки зерновых имеет ряд преимуществ, например тепловое воздействие на головотрубку, усики и лапки вредителей является важной составляющей механизма дезинсекции и определяет высокую эффективность плазменной обработки зерновой массы. Однако, для исследования механизма уничтожения скрытой зараженности, деструкции внутренних тканей вредителей и других качественных изменений, происходящих в компонентах зерновой массы и пищевых продуктах, необходим анализ многофакторного воздействия, в частности лазерного ультрафиолетового излучения. Воздействию лазерного излучения подвергали как взрослых особей (насекомые отряда жесткокрылых, равнокрылых, муравьи), так и личинки (яйца филлоксеры, яйца насекомых отряда полужесткокрылых), как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

В биологических тканях поглощение в основном вызвано молекулами воды или макромолекулами. У белков хромофорами являются фрагменты аминокислот, которые поглощают свет преимущественно в ультрафиолетовой области спектра (от 200 до 300 нм). В этом же диапазоне длин волн поглощают нуклеиновые кислоты. Клетки биологических тканей содержат сотни хромофоров поглощающих свет в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра.

Использование лазерной энергии для обработки материалов основано на поглощении лазерного излучения веществом. В ультрафиолетовом диапазоне поглощение определяется содержанием белка. Такой тип воздействия успешнее всего проявил себя при эпиляции.

Что касается насекомых, их отличительной чертой является наличие хитинового экзоскелета, представляющего собой наружный покров тела и конечностей. В хитине, аналогично коже и волосам человека, содержится пигмент – меланин. Меланин в норме

содержится в эпидермисе и волосных фолликулах, в хитине, покрывающем тело насекомых. Спектр поглощения меланина лежит в ультрафиолетовом (максимум) до 400 нм и видимом 400 – 760 нм диапазонах спектра [1]. Поглощение меланином лазерного излучения постепенно уменьшается по мере увеличения длины волны света. Ослабление поглощения наступает в ближней инфракрасной области спектра от 900 нм. При подборе наиболее подходящего лазера с заданной длиной волны, можно достигнуть максимальной эффективности поглощения излучения, что сможет обеспечить тепловое воздействие на поверхность тела и конечности насекомого, что в конечном итоге приведет к гибели вредителя.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ СРЕДАМИ

Для эпиляции чаще всего применяют красный диапазон, излучение этих длин волн хорошо поглощается меланином. Лазеры, применяемые для эпиляции, можно подбирать по длине волны, по энергии излучения и продолжительности импульсов. В случае Nd:YAG лазера, повреждение фолликула может быть фотомеханическим. Красный свет александритового или рубинового лазера хорошо поглощается меланином, присутствующим в корнях волос и волосных луковицах. Энергия светового импульса поглощается волосными фолликулами и преобразуется в тепловую энергию, что приводит к их нагреву и разрушению. В результате рост волос прекращается. Длительность и энергия лазерного импульса подбираются так, чтобы фолликулы успевали разрушиться. В связи с большим содержанием меланина, можно провести аналогию между волосами и покровом тел насекомых.

В первом примере для того чтобы показать эффективность использования пульсирующего ультрафиолетового лазера в борьбе с вредными насекомыми, авторы изобретения отобрали различных насекомых, клещей и яйца насекомых для облучения двумя монохроматическими источниками [3]. Для эксперимента использовались два эксимерных лазера с длиной волны 248 нм и 308 нм. Некоторые образцы подвергали воздействию прямого лазерного луча (100 мДж/см²), в то время как другие образцы подвергали воздействию расширенного луча из дивергирующих линз или телескопического устройства (1 мДж/см²). В примере номер 2 насекомых отряда жесткокрылых (Coleoptera) подвергали воздействию от 1 до 2 импульсов коллимированного ультрафиолетового лазерного луча при 248 нм и примерной мощности 100 мДж/см². Насекомые, подвергнутые воздействию 2 импульсов, погибают практически мгновенно в результате обширного теплового повреждения. Тепловое повреждение можно ясно видеть при увеличении, о чем свидетельствуют явный ожог (потемнение), обугливание антенн и исчезновение ярко выраженных участков пигментации в энтегумене. Пример 3. Группу насекомых отряда равнокрылых (Homoptera) раз-

мером от 1 – 2 мм до нескольких мм подвергают воздействию 1 – 3 импульсов ультрафиолетового света при 248 нм с приблизительной мощностью 108 мДж/см². При увеличении регистрируют результаты, сходные с описанными выше для Coleoptera. Насекомые погибают практически мгновенно в большинстве образцов в результате вызванного нагреванием повреждения, о чем свидетельствуют ожоги. Пример 4. Муравьев размером около 4 – 6 мм обрабатывают 10 импульсами расширенного луча ультрафиолетового лазера при 248 нм с приблизительной мощностью 0,8 мДж/см². После воздействия лазера муравьи быстро погибают. Пример 5. Яйца филлоксеры (Phylloxera) размером менее 1 мм и взрослых насекомых *Tetranychus urticae* (паутинный клещик) размером около 1 мм обрабатывают на листьях импульсами ультрафиолетового лазера при длине волны 308 нм и энергетической мощности от 25 до 2,3 мДж/см². Через 24 ч после обработки наблюдается 90%-е уменьшение популяции взрослых насекомых. Обработанные яйца выглядят обожженными (потемневшими), что обусловлено нагреванием [3].

Известен также способ дезинсекции, при котором зерно обрабатывали СВЧ полем. Работа заключалась в теоретическом исследовании и определении степени воздействия теплового фактора, в частности температурных градиентов и напряжений, на эффективность плазменной обработки зерна. Основой для исследования роли теплового фактора при СВЧ - плазменном воздействии на зерно и вредителей является модель тепломассообмена (в течение времени Δt) между горячей внешней средой - плазмой и капиллярно-пористым телом - зерном или вредителями. Исследование теплового фактора при плазменной обработке включало анализ температурных полей и вызванных большими температурными градиентами напряжений в зерне и вредителях зерна. Напряжения в зерне могут вызвать нежелательное трещинообразование и разрушение, а по отношению к вредителям могут играть положительную роль в механизме дезинсекции (потеря прочности и разрушение могут способствовать уничтожению вредителей).

В ходе исследования выявлено, что для полного уничтожения вредителей заданной мощности недостаточно, повышение мощности может привести к нежелательному разрушению зерна, однако, установлено, что усики, лапки и головотрубка у вредителей значительно перегреваются и их температура может достигать критической величины, что очевидно приведет к их обугливанию. Это подтверждается и в экспериментах на СВЧ - плазмотронах. Таким образом, тепловое воздействие на наружные органы вредителей является важной составляющей механизма дезинсекции и определяет высокую эффективность плазменной обработки зерновой массы [3].

Для оценки эффективности воздействия СВЧ поля, перегрев на поверхности хитинового покрова можно выразить:

$$\Delta T = \frac{qL}{\lambda} \left[\sqrt{\frac{F}{\pi}} + \frac{1}{4} F \right], \quad (1)$$

где q – величина теплового потока,

L – средняя величина покрова насекомых.

Оценка термонапряжения в хитиновом покрове и наружных органах вредителей сводится к решению конкретной задачи. Выявлена высокая степень варьирования температуры нагрева различных органов вредителей зерна [4].

3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

При взаимодействии с поверхностью материала, а в нашем случае это хитиновый слой, излучение частично отражается, а частично проникает внутрь материала, поглощается в нем и, как правило, достаточно быстро переходит в тепло. В этом случае изменение плотности лазерного потока по глубине описывается Бугера:

$$E(x) = E_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha x}. \quad (2)$$

A количество энергии, поглощенной в слое хитина, толщиной Δx

$$|\Delta E(x)| = E_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha x}. \quad (3)$$

Для случаев, когда используется импульсный режим работы того или иного лазера, можно оценить энергетический вклад с помощью данного выражения:

$$E = p \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau. \quad (4)$$

Увеличение передачи энергии в хитиновый слой можно достигнуть за счет увеличения плотности мощности q или увеличением импульса, однако характер нагрева тела насекомого, а так же его внутренних органов будет различным. Соответственно, такой параметр, как плотность мощности, играет важную роль в теплопередаче и нагреве внешней поверхности тела насекомого.

Оптические и термические свойства биологической ткани играют решающую роль для достижения определенной теплопередачи. В зависимости от коэффициента поглощения, мощности и длительности облучения в ткани поглощается определенная энергия на объем.

Дифференциальное уравнение теплопроводности связывает пространственное распределение температуры с изменением ее во времени и записывается следующим образом:

$$p \cdot c \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \Delta(k \nabla T(\vec{r}, t)) + S(\vec{r}), \quad (5)$$

где c – удельная теплоёмкость среды, $k = a_i \cdot p \cdot c$ – теплопроводность, a_i – температуропроводность,

$S(\vec{r}) = \mu_a \cdot \varphi \left(\vec{r} \cdot \frac{E_0}{\tau_p} \right)$ – объемная плотность источников

тепла в среде, μ_a – коэффициент поглощения, E_0 – плотность энергии вещества [5].

Для частных случаев возможны дополнительные параметры, связанные с особенностями строения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка новых методик по уничтожению вредных насекомых нехимическими способами является актуальной и требует дальнейшего изучения. На данный момент к таким следует отнести лазерное воздействие. В ходе анализа уже известных исследований выявлено, что для эффективного воздействия на покров тела вредных насекомых возможно использование CO₂, Nd:YAG, александритового или рубинового лазера, однако наиболее подходящим является УФ диапазон. Это связано с тем, что максимум поглощения меланина находится в ультрафиолетовой области. За счет спектральных характеристик изучаемой биологической ткани осуществляется максимально эффективная передача тепла на поверхность и внутренние органы насекомых, что является требуемым и необходимым условием для дезинсекции. Представленная математическая модель теплофизических процессов позволяет дать оценку эффективности применения лазерного излучения.

Также стоит отметить, что насекомые могут отличаться морфологией, отсюда следует, что в каждом частном случае требуется индивидуальное исследование особенностей строения, возможно, подбор иной длины волны, мощности и прочих параметров.

В заключение можно сказать, что применение лазерных технологий является новым методом борьбы с вредными насекомыми и требует дальнейшего изучения, проведения экспериментов и разработки аналитической базы.

Литература.

- [1] Шербаков И.А. Твердотельный лазер. Физическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т. 5. – 891 с.
- [2] Шентий О.В. Основные принципы и биологические механизмы воздействия лазерного излучения на кожу // Лазеры и Эстетика. №01, 2012. – С. 2 – 3.
- [3] Лэгуэнс-Соулз Мануэль К., Попеленский Н.К. Способ контролирования насекомых и клещей пульсирующим ультрафиолетовым облучением. пат. USA: 5364645 – №000227: заявл.10.06.1996; опублик. 24.12.1998, Бюл. № 5 – 7 с.
- [4] Усатиков С.В., Шаззо Ю.А. Анализ теплового фактора при плазменной обработке зерна // Известия высших

учебных заведений. Пищевая технология № 5-6, 1999 – С. 60-63

[5] Храмов В.Ю. Моделирование взаимодействия излучения с веществом в задачах лазерной оптики // В.Ю. Храмов, В.В. Назаров, А.Е. Пушкарева. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 111 с.

[5] Серебряков В.А. Лазерные технологии в медицине – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 266 с.

Поступила в редколлегию 15.11.2016



Котельников Владислав Валерьевич, аспирант факультета электронной техники, кафедры физических основ электронной техники, ХНУРЭ. Научные интересы: прецизионная лазерная техника.



Мачехин Юрий Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физических основ электронной техники, академик Академии наук прикладной радиоэлектроники. Научные интересы: лазерные прецизионные устройства, технология изготовления лазеров, технология применения лазеров.

УДК 681.7.069.24:366.643

Особливості впливу лазерного випромінювання на біологічні тканини / В.В. Котельников, Ю.П. Мачехін // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2016. — Том 15, № 4. — С. 366 – 369.

У статті обговорюються механізми і особливості взаємодії лазерного випромінювання з біологічними тканинами, до складу яких входять меланін або хітин. Наведено математичну модель основних теплофізичних процесів, що виникають в біологічній тканині під впливом лазерного випромінювання.

Ключові слова: лазерне випромінювання, хітинова тканина, меланін, НВЧ, шкідливі комахи, тепловий вплив.

Бібліогр.: 05 найм.

UDC 681.7.069.24:366.643

Features of laser radiation effects on biological tissue / V.V. Kotelnikov, Yu.P. Machekhin // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2016. — Vol. 15, № 4. — P. 366 – 369.

The paper presents considerations for the mechanisms and peculiarities of interaction of laser radiation with biological tissues containing melanin and chitin in their composition. A mathematical model of the basic thermophysical processes arising in a biological tissue under laser radiation is presented.

Keywords: laser radiation, chitin tissue, melanin, microwave, pests, heat exposure

Ref.: 05 items.