

Экспериментальное и теоретическое исследование динамики нагрева углеродсодержащих оптотермических волоконных конвертеров для лазерной хирургии

А.В.Беликов, А.В.Скрипник, В.Ю.Курнышев, К.В.Шатилова

Исследованы углеродсодержащие оптотермические волоконные конвертеры (УОТВК), расположенные на дистальном торце кварц-кварцевого оптического волокна, которое используется для доставки лазерного излучения в медицинских лазерных хирургических системах, и различающиеся толщиной и строением слоя материала, преобразующего лазерное излучение в тепло. Исследована динамика нагрева «плёночного» и «объёмных» конвертеров при средней мощности падающего на них излучения полупроводникового лазера с длиной волны 980 нм, равной 0,3, 1 и 4 Вт, в случае свободного размещения конвертеров на воздухе. Показано, что до момента разрушения эффективность нагрева поверхности конвертера лазерным излучением для плёночного конвертера может достигать 3000 °С/Вт, для объёмного сферического – 1000 °С/Вт, для объёмного плоского – 550 °С/Вт. Разрушение плёночного конвертера, сопровождающееся существенным снижением эффективности нагрева, наступает уже при средней мощности лазерного излучения 0.30 ± 0.05 Вт и связано с разрушением углеродной плёнки на его поверхности. Разрушение объёмного сферического конвертера происходит при средней мощности 4.0 ± 0.1 Вт, причём здесь разрушается углеродная плёнка на его поверхности и оплавляется модифицированный слой, содержащий микропузыри. Разрушение углеродной плёнки на поверхности объёмного плоского конвертера происходит также при мощности 4.0 ± 0.1 Вт, но при этом структура модифицированного слоя не отличается от исходной. Разработаны структурные и оптико-физические модели конвертеров. В основе моделирования лежит поглощение света углеродными плёнками, расположенными на поверхности УОТВК и внутри микропузырей, содержащихся в модифицированном слое конвертера. Продемонстрирована адекватность предложенных моделей УОТВК реальным конвертерам.

Ключевые слова: лазерное излучение, конвертер, кварц, лазер, углерод, волокно, эффективность, нагрев.

1. Введение

Лазерное излучение широко применяется при обработке различных материалов, в том числе для иссечения биотканей в медицине [1, 2]. Для большинства лазерных хирургических вмешательств эффективность иссечения тем выше, чем выше коэффициент поглощения света биотканью [3]. Лазерное излучение, достигая биоткани, преобразуется в тепло, которое приводит к коагуляции, испарению, карбонизации и иссечению биоткани. Наиболее эффективными принято считать CO₂-лазеры и эрбиевые лазеры [1–5], коэффициент поглощения излучения которых мягкими биотканями определяется поглощением воды. Так, для излучения CO₂-лазера ($\lambda = 10.6$ мкм) коэффициент поглощения воды составляет 825 см^{-1} [6], для излучения Er: YAG-лазера ($\lambda = 2.94$ мкм) – 12200 см^{-1} [6]. Однако в последнее время в лазерной хирургии стали широко использоваться полупроводниковые лазеры [1, 7–12], генерирующие в ближней ИК области спектра на длинах волн $\lambda = 0.81–0.98$ мкм. Излучение этих лазеров крайне слабо

поглощается мягкими биотканями. Известно, что коэффициент поглощения воды на $\lambda = 0.98$ мкм составляет 0.5 см^{-1} [13], слизистая оболочка в диапазоне $\lambda = 950–1000$ нм имеет коэффициент поглощения 0.4 см^{-1} [14, 15], кожа – коэффициент $0.2–2.0 \text{ см}^{-1}$ [15, 16], мышечная ткань – коэффициент $0.46–0.51 \text{ см}^{-1}$ [16].

В связи с этим эффективность преобразования энергии лазерного излучения в нагрев ткани крайне низка. В результате эффективность иссечения биоткани получается низкой, а размер зоны повреждения (коагуляции, денатурации, некроза) – значительным [5, 17–19].

Для повышения эффективности преобразования лазерного излучения в тепло в контактной лазерной хирургии на дистальный торец оптического волокна, по которому лазерное излучение доставляется к биоткани, помещают специальный преобразователь, при этом разрушение мягкой биоткани происходит в основном в результате контакта с нагретым до высоких температур (вплоть до 900 °С [20]) преобразователем. К сожалению, общее название (термин) для обозначения подобного рода преобразователей до сих пор не принято, что, возможно, связано с отсутствием достаточного объёма знаний о его природе, а также с многообразием строения и функций преобразователя. В ряде работ его называют оптотермическим волоконным конвертером (ОТВК) [14, 20–24], в других работах – blackened tip [21, 25–28], hot tip [29–34] или pre-initiated tip [35]. Название hot tip не указывает на размещение преобразователя на торце оптоволоконка, на материал преобразователя и на способ преобразования лазерной энергии, а отражает лишь то, что он является «горячим». При этом hot tip может представлять собой как

А.В.Беликов, А.В.Скрипник, К.В.Шатилова. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: meddv@grv.ifmo.ru, alesch_skrupnik@mail.ru, kshatlova@mail.ru

В.Ю.Курнышев. Филиал АО «Научно-производственная корпорация "Системы прецизионного приборостроения" в Санкт-Петербурге», Россия, 199034 С.-Петербург, В.О., 2-я линия; e-mail: vadimkurnyshev@gmail.com.

Поступила в редакцию 13 мая 2016 г.

слой углерода, размещённый на торце оптоволокна [29], так и слой металла, нанесённый на оптическое волокно [30, 33], или просто наконечник электрокоагулятора [34], не имеющего ничего общего с лазерной хирургической техникой.

Название *blackened tip* используется для обозначения покрытого углеродом конца кварцевого оптоволокна [25, 26, 28]. Углеродное покрытие может формироваться в результате лазерного воздействия на различные материалы, в том числе на дерево [25, 26, 28], биоткань [21, 23, 31] или пробку [23]. В работах [20, 32] отмечается, что *blackened tip* конвертирует оптическую энергию в тепловую. В [25–28, 36] показано, что этот преобразователь может использоваться как для теплового, так и для акустического воздействия, т. е. он позволяет конвертировать оптическое излучение в тепло или в акустическую волну, которые оказывают принципиально разное воздействие на биологические объекты. На основании этих данных можно сделать вывод о том, что название *blackened tip* в разных источниках используется для обозначения преобразователей с разными функциями.

В работе [35] описан *pre-initiated tip*, формируемый в результате нанесения на конец оптоволокна органических и неорганических пигментов, порошков металлов или неметаллических пигментов, при этом название также не даёт представления о том, где размещён преобразователь, о его материале и о способе преобразования лазерной энергии. Используемое в настоящей работе название ОТВК содержит информацию о размещении преобразователя (конвертера) на оптоволокне (волоконный) и способе преобразования лазерной энергии (оптотермический). Упоминание основного преобразующего свет материала в названии преобразователя (углерода) трансформирует название ОТВК в УОТВК – углеродсодержащий оптотермический волоконный конвертер.

В ряде случаев медицинские лазеры имеют системы контроля температуры оптотермических конвертеров, а также системы автоматической коррекции мощности излучения [21]. В работах [14, 22] описана технология, в которой температура ОТВК поддерживается в процессе обработки биоткани на заранее заданном уровне. Чем выше температура конвертера, тем эффективнее он может разрушать (иссекать) мягкую биоткань [37]. Максимальная температура, до которой конвертер может быть нагрет до момента его разрушения и которая может быть поддержана системой автоматического регулирования, определяется в том числе строением и свойствами самого конвертера, которые, в свою очередь, зависят от технологии изготовления. Технологии изготовления оптотермических конвертеров весьма разнообразны. К сожалению, в литературе крайне мало сведений о структуре различных типов ОТВК и об эффективности их нагрева лазерным излучением, отсутствуют данные, позволяющие корректно сравнивать конвертеры с различной структурой, а также адекватные структурные и оптико-физические модели конвертеров.

Для всех исследованных в настоящей работе типов конвертеров материал преобразующего слоя содержит углерод [29, 36, 38]. Конвертер первого типа формируется по технологии, описанной в [25, 38, 39], и представляет собой плёнку аморфного углерода [25, 38–40] («плёночный» конвертер). Конвертер второго типа формируется по технологии, описанной в [20, 36], и представляет собой покрытый снаружи углеродной плёнкой модифицирован-

ный слой, внутри которого наряду с аморфным углеродом содержится кварц, при этом толщина слоя может достигать 100 мкм и более («объёмный» конвертер). В зависимости от формы и локализации модифицированного слоя можно выделить объёмный плоский и объёмный сферический конвертеры. Диаметр объёмного плоского конвертера близок к диаметру оптического волокна, а модифицированный слой локализован в основном на торце волокна. Форма объёмного сферического конвертера близка к полусфере, диаметр конвертера существенно больше диаметра оптического волокна, а модифицированный слой локализован как на торце, так и на боковых поверхностях дистального конца оптического волокна.

Детально устройство объёмного УОТВК описано в работе [41], где в результате оптико-микроскопического исследования конвертеров и их шлифов было установлено, что наряду с углеродной плёнкой УОТВК содержит кварц, внутри которого располагаются микровключения. В эксперименте с окрашиванием шлифов объёмного конвертера было установлено, что микровключения являются полыми микропузырями, на стенках которых находится углеродная плёнка [41] и которые могут возникать в процессе плавления кварца на воздухе при его лазерном нагреве до температур, превышающих 1500 °С [42]. Согласно [41] характерный диаметр микропузыря для объёмного УОТВК составляет 19.6 ± 0.9 мкм.

Целью настоящей работы является экспериментальное сравнение эффективности нагрева поверхностей плёночного и объёмных конвертеров лазерным излучением; исследование динамики нагрева конвертеров на воздухе и определение средней мощности излучения полупроводникового лазера с длиной волны 980 нм, при которой эффективность нагрева остаётся постоянной в течение продолжительного времени; создание адекватных структурных моделей плёночного, объёмного плоского и объёмного сферического конвертеров, а также моделирование нагрева конвертеров лазерным излучением и сопоставление результатов расчёта температуры конвертеров с полученными в эксперименте.

2. Методы создания и оптико-микроскопическое исследование строения УОТВК

В настоящем исследовании для создания конвертеров использовалось излучение полупроводникового лазера системы Alta-ST (Dental Photonics, Inc., США). Лазерное излучение с длиной волны 980 ± 10 нм передавалось по кварц-кварцевому оптическому волокну [23]. Диаметр световедущей жилы оптического волокна составлял 400 ± 5 мкм (рис.1), общий диаметр волокна без полимерного покрытия – 440 ± 5 мкм, с полимерным покрытием – 475 ± 10 мкм. Средняя мощность излучения на выходе волокна достигала 25 Вт. Лазерное излучение представляло собой последовательность импульсов с длительностью 400 мкс, следующих друг за другом с частотой 2 кГц. Продолжительность последовательности лазерных импульсов была равна 12.0 ± 0.1 с.

Система Alta-ST имеет уникальную встроенную систему измерения температуры дистального торца оптического волокна. Конвертер располагается на этом торце. Система измеряет мощность теплового излучения, возникающего в результате нагрева ОТВК лазерным излучением.

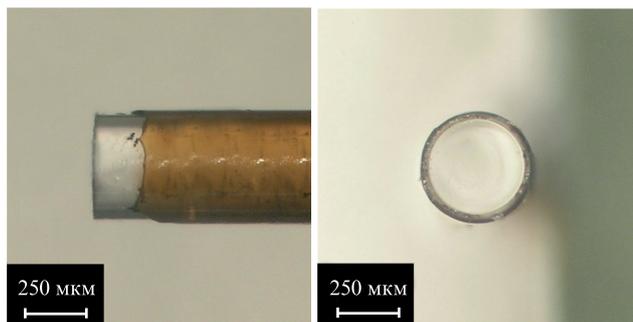


Рис.1. Внешний вид дистального конца оптического кварц-кварцевого волокна.

ем, доставляемым к конвертеру по оптическому волокну. Тепловое излучение распространяется от конвертера по тому же волокну, но в противоположном направлении лазерного излучения направлении. На входе в оптическое волокно тепловое излучение отделяется от лазерного спектроделителем и регистрируется ИК приёмником FD10D (Thorlabs, США), сигнал с которого поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и далее в соответствии с калибровочной кривой соотносится с температурой. Калибровка выполняется путём сопоставления амплитуды регистрируемого ИК приёмником сигнала на выходе АЦП с температурой на поверхности конвертера, измеренной в диапазоне 300–800 °С с помощью тепловизора Fluke Ti 400FT (Fluke, США), а в диапазоне 800–2500 °С с помощью пирометра «Проминь» (Каменец-Подольский приборостроительный завод, Украина). Предел чувствительности данной системы составлял ~390 °С из-за ограниченной спектральной чувствительности ИК приёмника и внутренних шумов приёмного тракта. АЦП позволяет измерять температуру каждые 30 мс, при этом погрешность её измерения не превышает 5%. Значение измеренной таким образом температуры конвертера отображается в режиме реального времени в окне программы stLase-1.19 (Dental Photonics, Inc., США) при подключении к USB-порту системы персонального компьютера.

Плёночный конвертер создавался в соответствии с процедурой, описанной в [25, 38, 39]. В этих работах конвертеры формировались на дистальном конце кварцевого оптического волокна диаметром 300–400 мкм [25, 38] под действием лазерного излучения с длиной волны 940 нм [38] или 970 нм [25] и мощностью от 1 Вт [38, 39] до 3 Вт [25] при длительности воздействия 1 с [25] на воздухе при

контакте волокна с деревом [25] или пробкой [38]. Эти конвертеры использовались в исследованиях, описанных в [25], в клинической практике [38], а также в коммерчески доступных моделях хирургических лазерных систем [39]. В настоящей работе при создании плёночного конвертера дистальный торец оптического волокна находился в контакте с плоской поверхностью мишени из пробкового дерева, при этом излучение полупроводникового лазера со средней мощностью 1.0 ± 0.1 Вт воздействовало на конвертер в течение 1.00 ± 0.01 с. В результате мишень разрушалась, а продукты её разрушения оседали на поверхность дистального торца волокна, формируя плёнку (рис.2, а, б).

При создании объёмного плоского конвертера дистальный торец оптического волокна находился в контакте с плоской поверхностью мишени из активированного угля, при этом излучение полупроводникового лазера с максимальной средней мощностью до 12.5 ± 0.1 Вт воздействовало на конвертер в течение 0.50 ± 0.01 с. В результате мишень разрушалась, а продукты её разрушения оседали на поверхность дистального торца волокна. После этого дистальный торец волокна размещался свободно на воздухе, а импульс излучения полупроводникового лазера с максимальной средней мощностью 8.0 ± 0.1 Вт и длительностью 1.00 ± 0.01 с воздействовал на конвертер дважды с паузой в 0.50 ± 0.01 с, формируя модифицированный слой (рис.3, а, б).

При создании объёмного сферического конвертера дистальный торец оптического волокна находился в контакте с плоской поверхностью мишени из активированного угля, при этом излучение полупроводникового лазера с максимальной средней мощностью до 15.0 ± 0.1 Вт воздействовало на конвертер в течение 0.50 ± 0.01 с. В результате мишень разрушалась, а продукты её разрушения оседали на поверхность дистального торца волокна. После этого дистальный торец волокна размещался свободно на воздухе, а импульс излучения полупроводникового лазера с максимальной средней мощностью 10.0 ± 0.1 Вт и длительностью 1.00 ± 0.01 с воздействовал на конвертер дважды с паузой в 0.50 ± 0.01 с, формируя модифицированный слой (рис.4, а, б).

Следует отметить, что на поверхности всех исследуемых конвертеров присутствует плёнка, наличие углерода в которой подтверждают результаты исследований [12, 25, 29, 36, 38], а, согласно данным рентгеноструктурного анализа [29, 36], на поверхности объёмного конвертера, сформированного при сходных с описанными выше

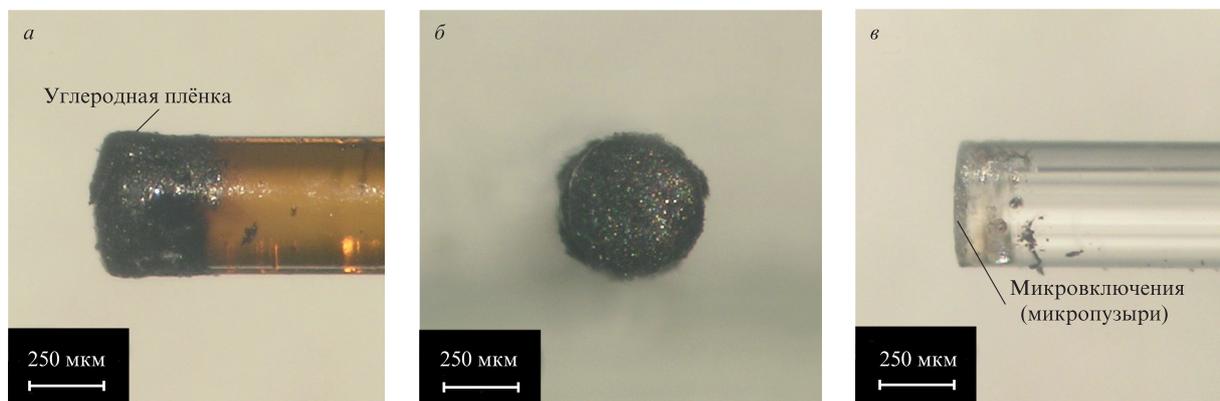


Рис.2. Внешний вид плёночного YOTVK до (а, б) и после (в) воздействия излучения полупроводникового лазера с длиной волны 980 нм и средней мощностью 4 Вт.



Рис.3. Внешний вид объёмного плоского УОТВК до (а, б) и после (в) воздействия излучения полупроводникового лазера с длиной волны 980 нм и средней мощностью 4 Вт.

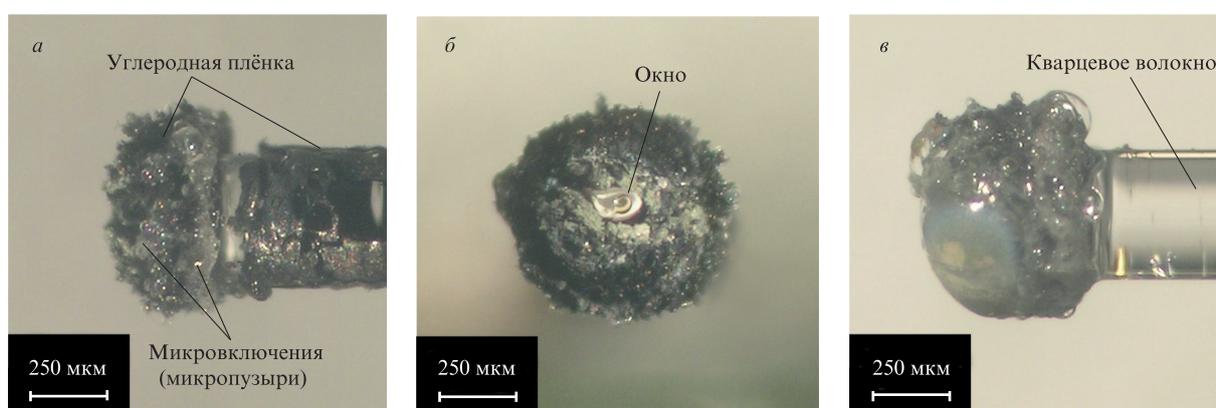


Рис.4. Внешний вид объёмного сферического УОТВК до (а, б) и после (в) воздействия излучения полупроводникового лазера с длиной волны 980 нм и средней мощностью 4 Вт.

условиями, может содержаться значительное (более 88%) количество углерода.

Для фотографирования и измерения геометрических размеров конвертеров использовался микроскоп AxioScore A1 (Carl Zeiss GmbH, Германия) со встроенной программой AxioVision rel.4.8.2 (Carl Zeiss GmbH, Германия), позволяющей определять размер помещённого в поле зрения микроскопа предмета с точностью до 1 мкм. Расчёт среднего значения измеряемого размера, например диаметра конвертера каждого типа, проводился на основе данных десяти отдельных измерений.

Диаметр плёночного конвертера составил 500 ± 20 мкм. Углеродной плёнкой покрыты торцевая и боковая поверхности конвертера. Толщина углеродной плёнки на поверхности плёночного УОТВК достигала 50 мкм.

Диаметр объёмного плоского УОТВК был равен 550 ± 20 мкм. Боковая поверхность УОТВК покрыта углеродной плёнкой. На боковой поверхности и торце можно различить микровключения. Микровключения на боковой поверхности исчезают на расстоянии примерно 150 мкм от торца УОТВК, т.е. длина объёмного плоского конвертера порядка 150 мкм. На торце конвертера углеродная плёнка отсутствует.

Диаметр объёмного сферического УОТВК составил 680 ± 20 мкм, а его длина была равна 340 ± 20 мкм. Боковая и торцевая поверхности УОТВК покрыты углеродной плёнкой. В центре УОТВК на продольной оси волокна присутствует прозрачное «окно» диаметром 150 ± 20 мкм. Вокруг окна располагаются микровключения.

3. Экспериментальное исследование динамики нагрева УОТВК

Для исследования температурной динамики конвертера при различных средних мощностях падающего на него лазерного излучения УОТВК размещались свободно в воздухе, а излучение полупроводникового лазера со средней мощностью 0.30 ± 0.05 Вт, 1.0 ± 0.1 Вт и 4.0 ± 0.1 Вт, распространяясь по оптическому волокну, на дистальном конце которого располагался конвертер, воздействовало на УОТВК в течение 12.0 ± 0.1 с, при этом фиксировалось изменение температуры конвертера во времени с шагом 30 мс. Всего в эксперименте при каждом значении средней мощности лазерного излучения была исследована динамика нагрева десяти образцов конвертеров каждого из описанных выше типов.

Результаты наиболее характерного эксперимента приведены на рис.5. Поскольку при калибровке системы измерения температура регистрировалась в точке, лежащей на боковой поверхности конвертера, обращённой к пирометру (тепловизору) и расположенной на расстоянии порядка 100 мкм от выходного торца конвертера, то и на рисунках представлена динамика нагрева именно в этой области.

Видно, что динамика нагрева ОВК зависит от типа конвертера и от средней мощности падающего на него лазерного излучения. Конвертеры разного типа при воздействии лазерного излучения с постоянной мощностью разогреваются до различных температур, разрушаются в

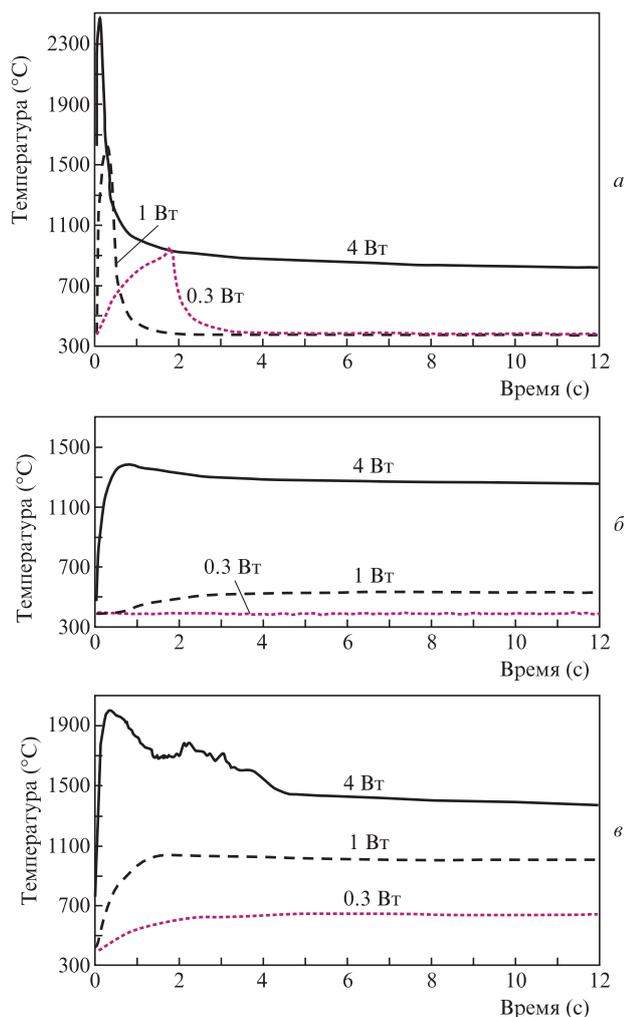


Рис.5. Динамика нагрева плёночного УОТВК (а), объёмных плоского (б) и сферического (в) УОТВК при различных средних мощностях падающего на конвертер излучения полупроводникового лазера с длиной волны 980 нм.

разное время и имеют различную форму. Для того чтобы сравнить на этапе экспериментального исследования эти объекты, мы используем параметр эффективности нагрева конвертера. Поскольку экспериментально невозможно оценить долю лазерного излучения, перешедшего в конвертере в тепловую энергию, параметр эффективности нагрева имеет специфическую размерность $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. В силу одинаковых условий эксперимента для каждого из конвертеров и единого метода оценки эффективности нагрева (в момент разрушения) мы полагаем данное сравнение корректным.

Для плёночного конвертера при всех значениях средней мощности лазерного излучения было зафиксировано его разрушение, при этом удалялась углеродная плёнка, а температура поверхности конвертера при постоянной мощности излучения начинала падать. Среди всех исследуемых в работе конвертеров эффективность нагрева поверхности данного конвертера при мощности падающего лазерного излучения 0.3 Вт к моменту разрушения конвертера (спустя 1.8 с после начала воздействия) составляла $3000^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ и была максимальной, что может быть связано с малой толщиной и высоким коэффициентом поглощения углеродной плёнки (22 см^{-1} [40]), а также с плохим тепловым контактом плёнки и волокна. Внешний

осмотр конвертера после лазерного воздействия показал, что углеродная плёнка на его поверхности отсутствует, т.е. она разрушается. Очевидно, что при разрушении плёнки исчезает поглотитель и конвертер перестаёт нагреваться.

С изменением средней мощности падающего лазерного излучения максимальная температура, после которой начинается снижение температуры конвертера, также изменяется. При этом если для мощностей 0.3 и 1 Вт после разрушения плёнки на 10-й секунде после начала лазерного воздействия наблюдается остывание конвертера до температуры, соответствующей пределу чувствительности температурного датчика системы Alta-ST (390°C), то при средней мощности 4 Вт конвертер на 10-й секунде остывает уже до температуры 800°C . Эффективность нагрева поверхности конвертера при этом составляет примерно $200^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Из представленной на рис.5,а зависимости видно, что в данном случае плёночный конвертер нагревается до температур свыше 2000°C . Согласно [29] при таких температурах формируются наночастицы аморфного углерода, который, вероятно, оседает на стенках микропузырей, образующихся при плавлении (кипении) кварца в приповерхностном слое дистального торца оптического волокна. Таким образом, после разрушения плёнки на поверхности оптического волокна остаётся слой, содержащий микропузыри, изнутри покрытые аморфным углеродом, которые, поглощая лазерное излучение, нагревают конвертер. На рис.2,в представлена фотография плёночного конвертера после воздействия лазерного излучения со средней мощностью 4 Вт. Видно, что на поверхности конвертера отсутствует углеродная плёнка и присутствует слой микропузырей.

Для объёмного плоского конвертера при средней мощности лазерного излучения 0.3 Вт температура конвертера не превысила предела чувствительности датчика системы. При средней мощности 1 Вт на 10-й секунде после начала лазерного воздействия эффективность нагрева поверхности конвертера лазерным излучением составила примерно $550^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, а внешний вид конвертера после прекращения воздействия не изменился по сравнению с исходным. При средней мощности 4 Вт на 10-й секунде после начала лазерного воздействия эффективность нагрева составила примерно $320^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, а температура конвертера в данном случае превысила 1200°C , и с поверхности конвертера исчезла углеродная плёнка. Разрушение углеродной плёнки на поверхности конвертера можно объяснить горением углерода на воздухе при температурах свыше 800°C [43]. На рис.3,в представлена фотография объёмного плоского конвертера после завершения воздействия лазерного излучения со средней мощностью 4 Вт. Видно, что на поверхности конвертера отсутствует углеродная плёнка и присутствует слой микропузырей.

Для объёмного сферического конвертера при средней мощности лазерного излучения 0.3 Вт на 10-й секунде после начала лазерного воздействия эффективность нагрева поверхности конвертера лазерным излучением составила примерно $2100^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, а внешний вид конвертера после прекращения воздействия не изменился по сравнению с исходным. При средней мощности 1 Вт на 10-й секунде после начала лазерного воздействия эффективность нагрева составила примерно $1000^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, и при этом с поверхности конвертера исчезла углеродная плёнка. При средней мощности 4 Вт на 10-й секунде после начала воздействия эффективность нагрева поверхности конвертера

лазерным излучением снизилась до 350 °С/Вт, температура конвертера достигла 2000 °С, а с поверхности конвертера исчезла углеродная плёнка.

Снижение эффективности нагрева можно объяснить плавлением кварца в модифицированном (содержащем микропузыри) слое, приводящим к изменению размеров микропузырей, изменению концентрации углерода и связанному с этим изменению показателя поглощения. На рис.4,в представлена фотография объёмного сферического конвертера после воздействия лазерного излучения со средней мощностью 4 Вт. Видно, что на поверхности конвертера отсутствует углеродная плёнка и присутствует оплавленный слой микропузырей.

4. Теоретическое исследование динамики нагрева УОТВК

При создании моделей каждого из конвертеров мы опирались на полученные в результате оптико-микроскопического исследования данные о характерных размерах и строении УОТВК. Поскольку поглощение кварца на длине волны используемого в настоящей работе лазерного излучения крайне мало [42], то нагрев УОТВК возможен только при поглощении излучения в углеродной плёнке. Эта плёнка может быть образована аморфным углеродом, коэффициент поглощения которого на длине волны 980 нм составляет примерно 22 см⁻¹ [29, 40]. Плёнка может находиться как на внешней поверхности УОТВК, так и на внутренней поверхности микропузырей в объёме кварца. На основании результатов оптико-микроскопических измерений геометрии образцов, использовавшихся в данном исследовании, при моделировании мы приняли, что толщина плёнки на торце плёночного конвертера равна 50 мкм, на боковых поверхностях – 30 мкм; для объёмных конвертеров толщина плёнки на поверхности УОТВК равна 5 мкм, а на поверхности микропузыря – 1 мкм [41]. Структурные модели конвертеров и модель строения материала УОТВК представлены на рис.6.

Согласно данным, приведенным в [41], коэффициент поглощения материала конвертера, содержащего микро-

пузыри, составляет 2.1 мм⁻¹, при этом в модифицированном слое УОТВК содержится 45.7% кварца, 45.7% воздуха и 8.6% углерода.

Для выполнения оптического расчёта использовалась программа TracePro 6.0 (Lambda Research Corporation, США). Была создана объёмная модель каждого конвертера, учитывающая его внешние размеры. В программе была смоделирована мода волокна с диаметром световодущей жилы 400 мкм. Внешняя углеродная плёнка в плёночном и объёмных конвертерах была однородна и изотропна, а её материал (аморфный углерод) имел коэффициент поглощения 22 мм⁻¹ и показатель преломления 1.57 [40]. Слой микропузырей в объёмных УОТВК был также однороден и изотропен, но имел коэффициент поглощения 2.1 мм⁻¹ и показатель преломления 1.27 [41], при этом на его поверхности была расположена изотропная плёнка с оптическими характеристиками внешней углеродной плёнки плёночного конвертера. Габариты конвертеров в модели соответствовали представленным на рис.6.

В результате трассировки лучей была получена доля лазерного излучения, поглощённая в УОТВК, а также распределение поглощённой мощности лазерного излучения в объёме конвертера. Распределение тепловых источников (рис.7) было получено в предположении, что вся поглощённая мощность лазерного излучения переходит в тепло. Видно, что в плёночном конвертере тепловые источники сосредоточены во внешней углеродной плёнке, в объёмном плоском – в слое, содержащем микропузыри, а в объёмном сферическом они распределены между углеродной плёнкой и слоем, содержащим микропузыри. Для всех типов конвертеров наибольшая доля поглощённой энергии соответствует области, расположенной ближе к границе между волокном и конвертером.

Для выполнения теплофизического моделирования использовалась программа COMSOL Multiphysics 4.3 (COMSOL Inc., США). Геометрическая модель УОТВК была тождественна модели для оптического расчёта. Внешняя углеродная плёнка в плёночном и объёмных конвертерах была однородна и изотропна, а её материал (аморфный углерод) имел плотность 1700 кг/м³, теплоём-

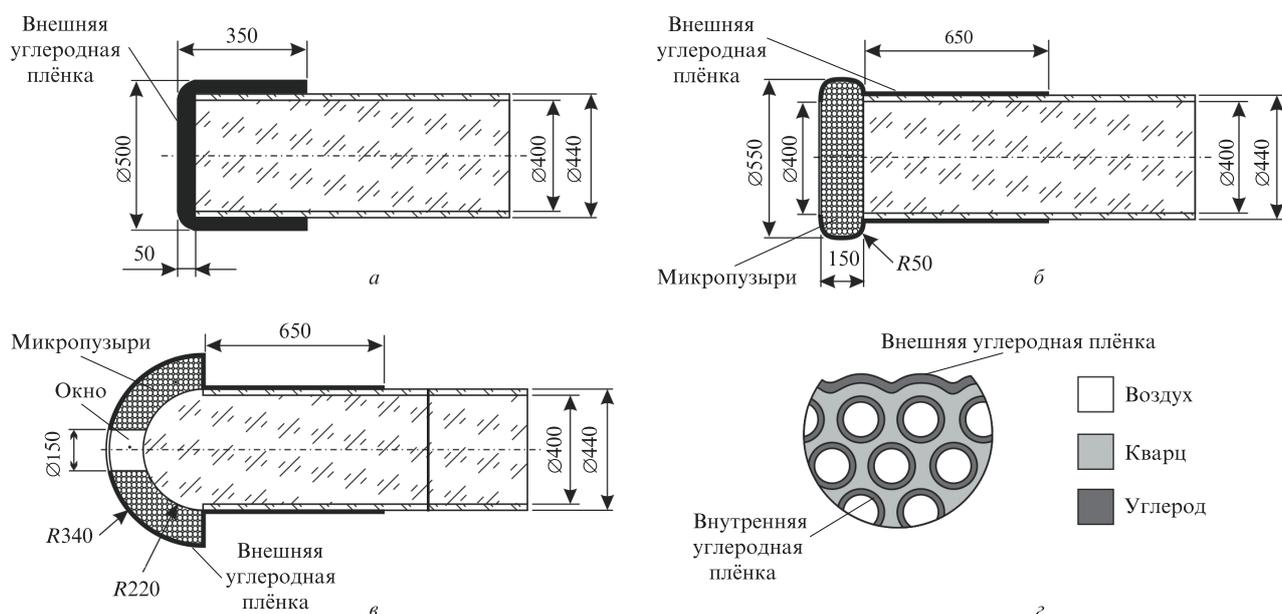


Рис.6. Структурные модели плёночного УОТВК (а), объёмных плоского (б) и сферического (в) УОТВК, а также модель структуры модифицированного слоя УОТВК (г). Размеры даны микрометрах.

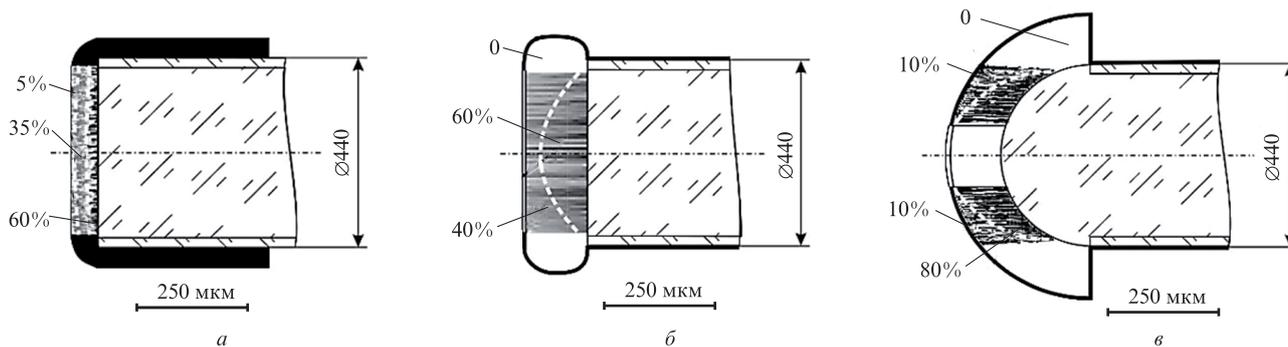


Рис.7. Распределение тепловых источников в объёме плёночного (а), объёмных плоского (б) и сферического (в) конвертеров. В процентах указана доля поглощённой энергии в данной области конвертера. Размеры даны микрометрах.

кость $690 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ и теплопроводность $375 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ [43]. Объёмные УОТВК были однородны и изотропны, но имели плотность $1125 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, теплоёмкость $850 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ и теплопроводность $1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ [41]. На решение накладывалось граничное условие в виде постоянной температуры ($+20^\circ\text{C}$) на входном торце оптического волокна. Длина оптического волокна составляла 3000 мм. На всех внешних поверхностях УОТВК происходят конвекционный и радиационный теплообмен (коэффициент конвекционного теплообмена $1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$, степень черноты 0.92). Внутри УОТВК находятся объёмные тепловые источники. Результатом расчёта являются стационарная температура, до которой нагревается УОТВК при заданной поглощённой мощности лазерного излучения, а также динамика разогрева УОТВК при фиксированной средней мощности излучения.

Учитывая высокую частоту следования лазерных импульсов (2 кГц), их малую длительность (400 мкс) и значительный временной интервал между измерениями (30 мс), можно заключить, что значение измеряемой в настоящем исследовании температуры соответствует усреднённой за время действия 60 лазерных импульсов температуре конвертера. В связи с этим вклад отдельного импульса не мог быть зафиксирован в эксперименте, и, следовательно, при моделировании импульсно-периодический характер лазерного излучения можно было не учитывать, а считать это излучение непрерывным и имеющим среднюю мощность, соответствующую эксперименту.

Структурная модель ОТВК позволила учесть вклад разрушения внешней углеродной плёнки в динамику нагрева конвертера. При нагреве плёнки до температуры 800°C начинается процесс горения углерода плёнки в результате взаимодействия с кислородом, содержащимся в окружающем УОТВК воздухе [44]. Поскольку приток кислорода можно считать бесконечным, то через определённое время весь углерод на поверхности УОТВК должен сгореть. Внешняя углеродная плёнка является тонкой оболочкой, т.е. при теплофизическом моделировании можно пренебречь её толщиной и представить плёнку в виде поверхностного теплового источника. Мы полагаем, что если мощность падающего лазерного излучения и свойства плёнки постоянны, то доля поглощённого излучения в плёнке будет зависеть только от её толщины.

При достижении температуры 800°C и последующем нагреве плёнка выгорает, и её толщина уменьшается. Следовательно, будет уменьшаться и доля поглощённой лазерной энергии. Таким образом, при моделировании данного процесса выгорание плёнки можно представить как постепенное снижение мощности поверхностного те-

плового источника. Методика расчёта и результаты моделирования вклада разрушения внешней углеродной плёнки в динамику нагрева конвертера представлены в работе [41]. При нагреве внешней углеродной плёнки лазерным излучением вследствие её деформации может измениться тепловой контакт между плёнкой и поверхностью кварцевого волокна, что также нужно учитывать при моделировании.

С углеродом, содержащимся внутри микропузырей, наблюдается иная ситуация. Этот углерод может взаимодействовать только с фиксированным объёмом кислорода, содержащегося внутри каждого микропузыря. Учитывая геометрию описанной выше модели, расчёт массовых долей кислорода и углерода показывает, что кислорода внутри микрополостей хватит лишь для сгорания менее 1% углерода, находящегося на стенках данных микрополостей. Таким образом, углерод, содержащийся внутри микропузырей, по большей части не вступает в химические реакции и, следовательно, не изменяет своей поглощательной способности вплоть до температур, соответствующих температуре плавления кварца [42]. При плавлении окружающего микропузыря кварца опикофизические свойства материала УОТВК начинают неконтролируемо изменяться, а модель перестаёт адекватно описывать эксперимент.

В настоящей работе выполнено моделирование распределения температуры внутри объёма конвертеров, включая волокно, на котором они расположены. Установлено, что температура по длине конвертеров распределена неравномерно. Так, при воздействии излучения мощностью 0.3 Вт для плёночного конвертера полученная при моделировании температура на его поверхности через 1 с достигает 780°C (в эксперименте $800 \pm 50^\circ\text{C}$), а на расстоянии 0.5 мм от его торца она уже равна 480°C . Для объёмного плоского конвертера температура на поверхности через 10 с составляет 550°C (в эксперименте $550 \pm 50^\circ\text{C}$), а на расстоянии 0.5 мм от торца – 450°C . Для объёмного сферического конвертера температура на поверхности через 10 с достигает 1050°C (в эксперименте $1000 \pm 50^\circ\text{C}$), а на расстоянии 0.5 мм от торца – 800°C .

На рис.8–10 представлены экспериментальные и рассчитанные согласно описанной выше модели температурные поля, сформированные на поверхности плёночного и объёмных конвертеров при воздействии излучения полупроводникового лазера с длиной волны 980 нм, а также динамика нагрева поверхности этих конвертеров.

Следует отметить, что полученная в результате моделирования температура на поверхности УОТВК удовлетворительно коррелирует с измеренной эксперименталь-

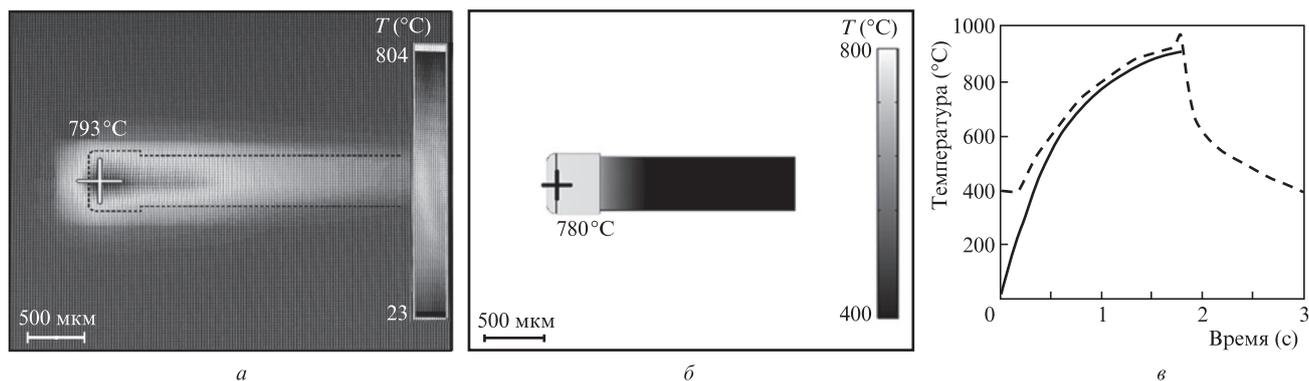


Рис.8. Температурное поле (эксперимент (а), расчёт (б)) на поверхности плёночного УОТВК через 1 с после начала лазерного воздействия и динамика нагрева (штриховая кривая – эксперимент, сплошная кривая – расчёт) в точках на поверхности конвертера, отмеченных курсорами (средняя мощность 0.3 Вт, длина волны 980 нм) (в). Цветные варианты рис.8, 9 и 10 даны на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

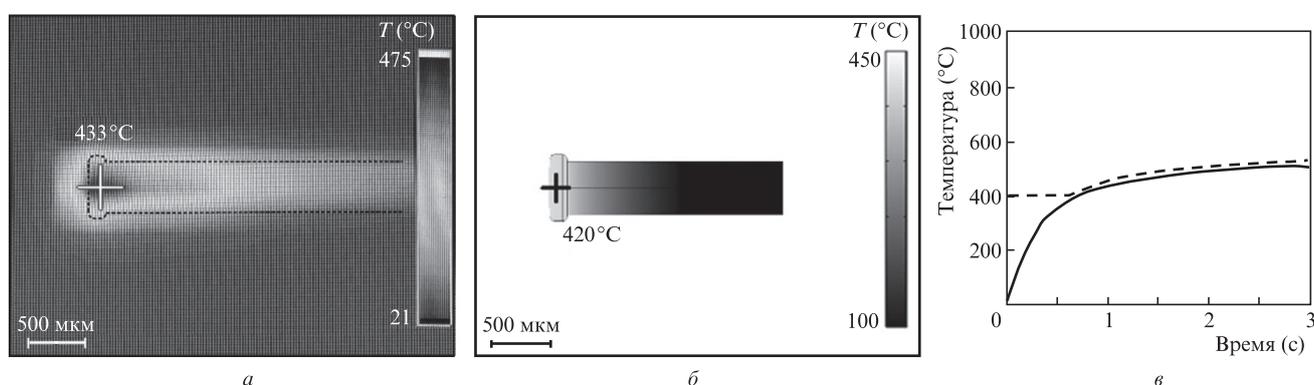


Рис.9. То же, что и на рис.8, но для объёмного плоского УОТВК при средней мощности 1 Вт.

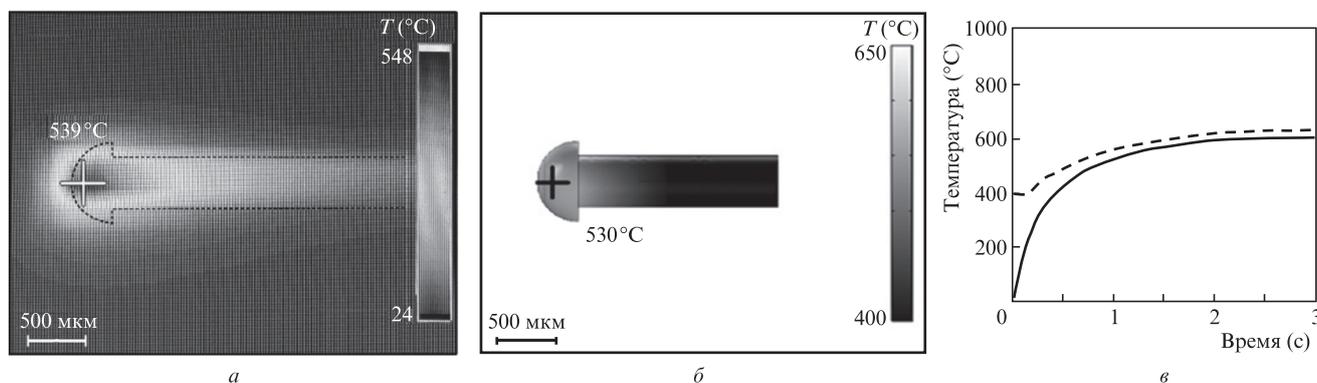


Рис.10. То же, что и на рис.8, но для объёмного сферического УОТВК.

но, что подтверждает адекватность используемых в настоящей работе моделей УОТВК реальным образцам конвертеров.

5. Выводы

Исследованы структура и динамика нагрева УОТВК для лазерной хирургии. Эффективность нагрева поверхности конвертера лазерным излучением на воздухе зависит от типа конвертера и от средней мощности падающего на него излучения. Эта эффективность изменяется с течением времени, что обусловлено разрушением поглощающих структур конвертера (углеродная плёнка, микропузыри) и плавлением контактирующего с ними квар-

цевого оптического волокна. Максимальная эффективность нагрева наблюдалась для плёночного конвертера и была равна 3000 °С/Вт. Конвертер этого типа разрушался спустя несколько секунд после начала воздействия лазерного излучения даже со средней мощностью 0.3 Вт. Минимальная эффективность нагрева поверхности зафиксирована для объёмного плоского конвертера и составила 550 °С/Вт. Конвертер этого типа не разрушился при средней мощности 1 Вт, а после воздействия лазерного излучения со средней мощностью 4 Вт утратил лишь углеродную плёнку на поверхности, при этом эффективность нагрева поверхности уменьшилась до 320 °С/Вт и сохранялась на этом уровне до конца эксперимента.

Разработаны структурные модели конвертеров. Основными поглощающими лазерное излучение структурами конвертеров считались углеродная плёнка и возникающие при плавлении кварца в процессе создания и эксплуатации конвертера микропузыри, на поверхности которых также присутствует углерод. Выполнены оптический и теплофизический расчёты для разработанных моделей конвертеров. Результаты моделирования нагрева конвертеров удовлетворительно совпали с результатами эксперимента.

1. Rai P.K., in *Emerging Trends in Laser & Spectroscopy and Applications* (New Delhi: Allied Publishers, 2010, p. 140).
2. Gubitosi A., Ruggiero R., Ortolani R., Podzemny V., Parmeggiani D., Esposito E., Foroni F., Esposito A., Villaccio G. *Ann. Ital. Chir.*, **75**, 515 (2012).
3. Kaufmann R., Hartmann A., Hibst R. *J. Dermatol. Surg. Onc.*, **20**, 112 (1994).
4. Rao G., Tripathi P.S., Srinivasan K. *Int. J. Laser Dent.*, **2**, 74 (2012).
5. Kaufmann R., Hibst R. *Clin. Exp. Dermatol.*, **15**, 389 (1990).
6. Wieliczka D.M., Weng S., Querry M.R. *Appl. Opt.*, **28**, 1714 (1989).
7. Romanos G., Nentwig G.H. *J. Clin. Laser Med. Sur.*, **17**, 193 (1999).
8. Sanz-Moliner J.D., Nart J., Cohen R.E., Ciancio S.G. *J. Periodontol.*, **84**, 152 (2013).
9. Qafmolla A., Bardhoshi M., Gutknecht N., Bardhoshi E. *ESJ*, **10**, 334 (2014).
10. Angermair J., Dettmar P., Linsenmann R., Nolte D.J. *Cosmet. Laser Ther.*, **17**, 296 (2015).
11. Штиршайдер Ю.У., Волнухин В.А. *Вестник дерматологии и венерологии*, **6**, 98 (2009).
12. Romanos G.E., Belikov A.V., Skrypnik A.V., Feldchtein F.I., Smirnov M.Z., Altshuler G.B. *Laser. Surg. Med.*, **47**, 411 (2015).
13. Vogel A., Venugopalan V. *Chem. Rev.*, **103**, 577 (2003).
14. Альтшулер Г.Б., Беликов А.В., Скрипник А.В., Фельдштейн Ф.И. *Инновационная стоматология*, **1**, 2 (2012).
15. Bashkatov A.N., Genina E.A., Kochubey V.I., Tuchin V.V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38**, 2543 (2005).
16. Bashkatov A.N., Genina E.A., Tuchin V.V. *J. Innov. Opt. Health Sci.*, **4**, 9 (2011).
17. Beer F., Körpert W., Passow H., Steidler A., Meinel A., Buchmair A.G., Moritz A. *Laser. Med. Sci.*, **27**, 917 (2012).
18. Capon A., Mordon S. *Am. J. Clin. Dermatol.*, **4**, 1 (2003).
19. Rizzo L.B., Ritchey J.W., Higbee R.G., Bartels K.E., Lucroy M.D. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, **225**, 1562 (2004).
20. Скрипник А.В. *Изв. вузов. Сер. Приборостроение*, **56**, 37 (2013).
21. Belikov A.V., Feldchtein F.I., Altshuler G.B. US Patent № 2012/0123399 A1/№ 13/379,916; appl. 31.12.2010; pub. 17.05.2012.
22. Altshuler G.B. *Proc. 19th Annual Conf. of the Academy of Laser Dentistry* (Scottsdale, AZ, USA, 2012).
23. Dental Photonics, Inc. *Alta-ST Soft Tissue Surgical Modular System User Manual* (Walpole, MA, USA, 2015).
24. Belikov A.V., Skrypnik A.V., Shatilova K.V. *Frontiers of Optoelectronics*, **8**, 212 (2015).
25. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. *Laser Phys.*, **20**, 1641 (2010).
26. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. *Laser Phys.*, **21**, 1230 (2011).
27. Bagratashvili V.N., Yusupov V.I., Chudnovskii V.M. *Proc. III Int. Symp. «Topical Problems of Biophotonics»* (St-Petersburg–N.Novgorod, 2011, p. 269).
28. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N., in *Hydrodynamics – Advanced Topics* (Rijeka, Croatia, InTech, 2011).
29. Беликов А.В., Скрипник А.В., Зулина Н.А. *Изв. вузов. Сер. Приборостроение*, **56**, 50 (2013).
30. Abela G.S., Fenech A., Crea F., Conti C.R. *Laser. Surg. Med.*, **5**, 327 (1985).
31. Amin Z. *Laser. Med. Sci.*, **10**, 157 (1995).
32. Van den Bos R.R., Kockaert M.A., Neumann H.M., Bremmer R.H., Nijsten T., van Gemert M.J. *Laser. Med. Sci.*, **24**, 247 (2009).
33. O'Reilly G.V. US Patent № 4735201/4,735,201; appl. 30.01.1987; pub. 13.08.1987.
34. Friedman J. US Patent № 3875945/3,875,945; appl. 02.11.1973; pub. 08.04.1975.
35. Sivriver A., Boutoussov D. US Patent № 20150230865; appl. 20.02.2015; pub. 27.08.2015.
36. Скрипник А.В. *Изв. вузов. Сер. Приборостроение*, **5**, 385 (2015).
37. Welch A.J., Bradley A.B., Torres J.H., Motamedi M., Ghidoni J.J., Pearce J.A., Hussein H., O'Rourke R.A. *Circulation*, **76** (5), 1353 (1987).
38. Doshi Y., Shah M., Khandge N., Sanghavi A.J. *Oral Laser Applications*, **10**, 165 (2010).
39. Biolase Technology, Inc. *EzLase User Manual* (Irvine, CA, USA, 2015).
40. Mahtani P. *Doct. dis.* (University of Toronto, Toronto, 2010).
41. Belikov A.V., Skrypnik A.V., Kurnyshev V.Y. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9917**, 99170G (2016).
42. Постников В.С. *Оптическое материаловедение: курс лекций* (Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического ун-та, 2013).
43. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. *Теплофизические свойства компонентов горючих систем* (М., НПО «Инфор ТЭИ», 1992, с. 184).
44. Предводителев А.С., Хитрин Л.Н., Цуханова О.А., Колодцев Х.И., Гроздовский М.К. *Горение углерода* (М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1949).