

Моделирование и оптимизация форм-фактора светотехнических систем медицинских аппаратов для широкоспектральной фототерапии ран

© А.С. Камруков, К.Л. Карначев, А.В. Кондратьев, Ю.А. Нащёкина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

С использованием программной среды TracePro проведены моделирование и оптимизация светотехнических систем фототерапевтических аппаратов для лечения ран и локализованных инфекций. В качестве источника излучения рассмотрена импульсная ксеноновая лампа. Определены факторы, влияющие на эффективность передачи энергии и однородность распределения излучения по световому пятну. Установлено, что форма диффузного отражателя слабо влияет на характеристики полей облученности. В связи с этим в качестве оптимальных рекомендованы конический и трапециевидальный форм-факторы отражателей как наиболее технологичные в изготовлении. Показано, что коэффициент диффузного отражения рефлектора существенно влияет на энергетические характеристики зоны облучения и равномерность облученности, не изменяя размеры светового пятна. Рассмотрены современные отражающие материалы для фототерапевтических аппаратов. Проведено сравнение результатов численного моделирования полей облученности с данными прямых экспериментальных измерений и показано их хорошее соответствие. Это делает возможным рекомендовать использование разработанного методического подхода при проектировании аппаратов для фотомедицины. Данные, полученные при моделировании, позволяют по известным спектральным характеристикам лампы определять время облучения раневых поражений, необходимое для достижения требуемой энергетической дозы при проведении фототерапевтических процедур.

Ключевые слова: лечение ран, оптическое излучение, сплошной спектр, импульсная ксеноновая лампа, фототерапевтический аппарат, светотехническая система, численное моделирование, оптимизация

Введение. В последние годы проблема лечения ран и раневой инфекции приобрела особую актуальность в связи с распространением патогенной микрофлоры, обладающей множественной лекарственной устойчивостью [1]. Это стимулирует активные исследования и разработку новых высокоэффективных медицинских технологий для лечения ран и локализованных инфекций. Среди перспективных методов выделяют основанные на оптических технологиях терапевтические подходы [2], такие как низкоинтенсивная лазерная терапия [3], лечение некогерентным излучением различных диапазонов оптического спектра (УФ-излучением [4], синим [5] и красным [6] светом) и фотодинамическая терапия [7].

В этом контексте представляют интерес разрабатываемые в МГТУ им. Н.Э. Баумана новые биоцидные и терапевтические плазменно-

оптические технологии [8, 9]. Они основаны на использовании импульсного оптического излучения со сплошным спектром, аналогичным солнечному, но с существенно большей долей коротковолнового (биоцидного) УФ-излучения (200...300 нм) и с интенсивностью, превышающей солнечную в десятки тысяч раз. Такое излучение генерируется импульсными ксеноновыми лампами, ранее широко применявшимися для оптической накачки лазеров. Прототипы аппаратов для лечения ран, созданные на основе этих технологий, в настоящее время проходят стадию доклинических испытаний [10]. Предварительные результаты показывают, что аппараты обладают выраженным бактерицидным и ранозаживляющим действием, обеспечивая более высокие темпы заживления ран, чем традиционные методы терапии [10, 11]. Это свидетельствует о потенциальной перспективности использования аппаратов импульсного высокоинтенсивного оптического облучения в медицинской и ветеринарной практике для лечения и профилактики раневых поражений.

Разрабатываемые аппараты состоят из сервисного блока и облучателя. Светотехническая система (СТС) облучателя, образованная импульсной лампой и отражателем, предназначена для концентрации потока излучения лампы на обрабатываемом объекте. Терапевтическая эффективность аппарата в целом в значительной степени зависит от эффективности СТС, которая определяется коэффициентом актуального использования энергии излучения лампы, размером и степенью равномерности облучения обрабатываемой поверхности. Последнее необходимо для синхронного протекания фотобиологических реакций и достижения одинакового биологического эффекта на различных участках зоны облучения. При фиксированных спектрально-энергетических характеристиках лампы и ее габаритах эффективность СТС зависит от форм-фактора отражателя и отражательных свойств материала, из которого он изготовлен. В связи с этим выбор и оптимизация материала и форм-фактора отражателя является актуальной задачей при проектировании и разработке фототерапевтических аппаратов.

Цель настоящей работы — численное моделирование и оптимизация СТС медицинских аппаратов для импульсной широкоспектральной фототерапии ран и локальных инфекций.

Методы и материалы. Моделирование СТС выполнено на базе программного обеспечения TracePro — универсальной программы, способной моделировать широкий круг оптических явлений и объектов. Расширенные функциональные возможности TracePro позволяют выявлять и изучать траектории прямого и рассеянного света, визуализировать и количественно определять любую отдельную траекторию луча. Трассировка лучей, испускаемых источником, осуществляется численным моделированием по методу Монте-Карло путем введения вероятностных характеристик таких процессов, как отражение, пропускание,

рассеяние, поглощение; точность расчетов зависит от числа выбранных лучей (чем их больше, тем она точнее). Программа позволяет отображать лучи из траектории, а также строить двух- и трехмерные диаграммы интенсивности падающего излучения. Отчет о потоке содержит количественную информацию о том, какая мощность излучения падает и поглощается на каждой поверхности и объекте.

В качестве источника излучения рассматривали ламбертовский излучатель в виде цилиндра, размеры которого соответствовали размерам тела свечения малогабаритной импульсной ксеноновой лампы ИНП-5/60 (диаметр $D = 5$ мм, длина $L = 60$ мм). Лампы этого типа использовались в экспериментальных медицинских аппаратах «Зарница-А», описанных в [10, 11]. Для того чтобы упростить анализ результатов расчетов, мощность излучения источника принимали равной 1 Вт.

При выборе материала отражателя исходили из следующего. Характер отражения может быть зеркальным или диффузным. Обычно отражатели с зеркальным отражением применяются в СТС, предназначенных для передачи световой энергии на большие расстояния (прожекторные системы) или для построения изображений на удаленном экране (проекционные системы). В случае фототерапевтических аппаратов, осуществляющих облучение поверхностей в ближней зоне (на дистанциях порядка или меньше характерного размера источника излучения — 10...100 мм), использование зеркальных отражателей нецелесообразно, поскольку трудно получить равномерное освещение актуальной поверхности, особенно при варьировании расстояния от облучателя до объекта. В связи с этим рассматривали только отражатели с матовой отражающей поверхностью, для которой характерно диффузное отражение.

Следующее требование, предъявляемое к материалу отражателя фототерапевтического аппарата для лечения ран, заключается в том, что он должен обладать высокими коэффициентами отражения не только в видимой области, но и в УФ-диапазоне спектра, включая его коротковолновую область, охватывающую диапазон от 200 до 300 нм. Эта область спектра характеризуется максимальной микробицидной эффективностью. Высокими коэффициентами отражения света R в видимом и УФ-диапазонах обладают алюминий ($R = 75...92$ % в зависимости от обработки [12] и наличия окисной пленки, снижающей коэффициент отражения излучения в УФ-области), а также оксиды бария и магния ($R \geq 90$ %). Алюминий имеет высокое значение теплопроводности, что важно для обеспечения эффективного теплоотвода из рабочей зоны, поэтому алюминий, как правило, является одним из основных конструктивных материалов для изготовления отражателей.

Среди конструкционных отражающих материалов в последние годы широко применяется анодированный алюминий, т. е. алюминий со специальным покрытием, получаемым электролитическим способом. Основное назначение этого покрытия — предотвращение процесса окисления на воздухе и защита от механических повреждений. Анодированный алюминий компании ALANOD GmbH & Co. (Германия) выпускается в вариантах преимущественно как зеркального, так и диффузного отражения [13]. Анодированный алюминий марки ALANOD®33PKG с ячеистой поверхностью имеет коэффициент полного (он же диффузного) отражения 86 % (R изменяется от 48 до 85 % в диапазоне длин волн 200...300 нм). Для УФ-приборов компания разработала специальные материалы с максимальными коэффициентами отражения УФ-излучения в области 280...400 нм (MIRO®UV A/B, $R = 87...90\%$) и 200...280 нм (MIRO®UV C, $R = 78...90\%$) [14].

Возможен и другой вариант получения поверхности с высокими рассеивающими свойствами — использование листового микропористого политетрафторэтилена (ПТФЭ или фторопласт-4), обладающего очень хорошим рассеянием и фотохимической стойкостью в УФ-области спектра. Такой материал получают путем спекания микрочастиц или микроволокон ПТФЭ с использованием нагрева и давления (так называемый экспандированный фторопласт). Этот метод позволяет точно контролировать свойства получаемого материала, включая размер и объем пор (технология освоена компанией Thorlabs, США, [15] и ООО «Формопласт», Санкт-Петербург, РФ [16]). По данным Thorlabs, средний коэффициент отражения листов из микропористого ПТФЭ составляет ~ 93 % (а это почти ламбертовское отражение) в диапазоне 250...400 нм. По сравнению с полированным алюминием или нержавеющей сталью характеристики отражения такого материала лучше, при этом его физические свойства, как утверждают изготовители, сохраняются при температурах до 260 °С.

Таким образом, анализ оптических свойств материалов для отражателя фототерапевтических аппаратов показывает возможный диапазон вариаций коэффициента диффузного отражения от 48 до 93 %. При изучении общих закономерностей влияния коэффициента диффузного отражения рефлектора на пространственно-энергетические характеристики зоны облучения моделирование выполнено для более широкого диапазона изменений R — от 10 до 100 %.

Численное моделирование СТС фототерапевтических аппаратов проведено в два этапа. На первом этапе оптимизировали конструкцию СТС с коаксиальным расположением лампы внутри отражателя, внутренняя поверхность которого выполнена в виде поверхности вращения. Преимуществом такой СТС является практически полный перехват отражателем светового потока источника излучения. Для сравнительного анализа рассмотрены три вида отражателей: цилиндрический, конический и эллиптический (рис. 1).

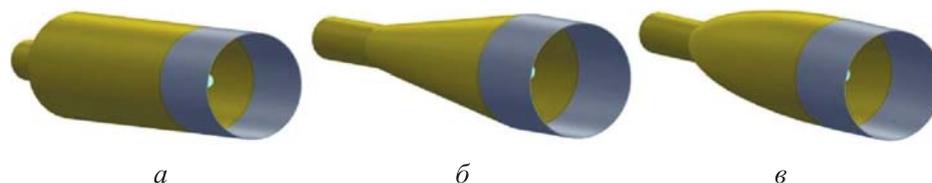


Рис. 1. Осесимметричные конструкции отражателей для фототерапевтических аппаратов:
a — цилиндрический; *б* — конический; *в* — эллиптический

На конструкцию отражателя накладывались определенные ограничения, связанные с габаритными размерами лампы и узлами ее крепления и токоподвода: длина отражающей части отражателя — 140 мм, диаметр выходного (переднего) торца отражателя — 55 мм, диаметр заднего торца, через который выводятся провода питания, — 20 мм. К отражателю примыкает цилиндрический тубус-дистанционатор (насадка) длиной 50 мм со световым диаметром 55 мм. Рассмотрено два варианта исполнения тубуса — с диффузно отражающей внутренней поверхностью (коэффициент отражения равен коэффициенту отражения основной отражающей поверхности) и с полностью поглощающей внутренней поверхностью. Были проанализированы распределения облученности на плоской площадке (экране) размером 150×150 мм, удаленной от среза облучателя на расстояния l , равные 0, 20, 50 и 100 мм. Расчетные схемы облучателей с основными размерами показаны на рис. 2.

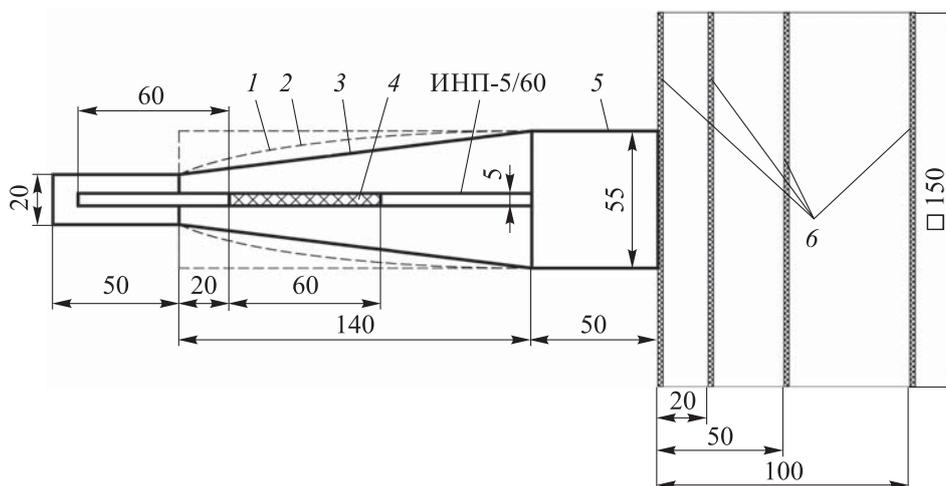


Рис. 2. Расчетная схема облучателей аппарата «Зарница-А»:
 1 — цилиндрический отражатель; 2 — эллиптический отражатель; 3 — конический отражатель; 4 — тело свечения; 5 — насадка; 6 — экран

При моделировании полагали, что материал отражающей поверхности рефлектора отражает падающее на нее излучение по закону Ламберта (диффузное отражение). Если луч света после отражения от рефлектора попадает обратно на лампу, то считалось, что он полностью отражается, рассеиваясь от нее также по ламбертовскому закону — зеркального отражения не происходит. Тестовые расчеты с полностью поглощающей поверхностью лампы показали, что пиковые значения создаваемой облученности в этом случае отличаются (естественно, в меньшую сторону) на 10...30 % по сравнению с полностью отражающей лампой при вариации коэффициента отражения рефлектора в практически значимом диапазоне $R = 40...90$ % (отличия возрастают с увеличением R). При этом относительное распределение облученности по световому пятну и его характерные размеры практически не изменяются.

На втором этапе рассматривали оптические системы, построенные по традиционной схеме осветительного устройства. Для выбора наиболее эффективной формы поверхности отражателя были рассмотрены несколько вариантов конструкции отражателя: трапецеидальный, эллиптический и параболический.

Оптимальность геометрии отражателя определяли по трем критериям: максимальной достигаемой на данном расстоянии облученности E_{\max} , Вт/м², ее равномерности ξ , %, [17]

$$\xi = \left(1 - \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right) \cdot 100 \%$$

и оптической эффективности (коэффициенту актуального использования энергии излучения лампы) η , %,

$$\eta = \frac{P}{P_0} \cdot 100 \%,$$

где P — мощность излучения, которая приходит на рассматриваемую поверхность, Вт; P_0 — мощность источника, $P_0 = 1$ Вт; E_{\max} и E_{\min} — максимальная и минимальная плотности мощности излучения, приходящего на поверхность (или ее облученность), Вт/м². При расчетах ξ и η рассматривали область облучаемой поверхности $\varnothing 90$ мм, соответствующую диаметру обычно применяемых в микробиологических экспериментах чашек Петри.

Полученные при моделировании данные позволяют по известным спектральным характеристикам лампы определять энергетические дозы и, соответственно, время облучения, необходимые для проведения терапевтической процедуры. В частности, по максимальным значениям облученности E_{\max} можно рассчитать плотность энергии излучения

(или флюенсы), приходящего на облучаемую поверхность за один импульс, в интегральном спектре $E_{s\Sigma}$ и в актуальном спектральном диапазоне, например, в УФ-С диапазоне ($\Delta\lambda = 200 \dots 280$ нм) $E_{sУФ-С}$:

$$E_{s\Sigma} = \frac{E_{\max}}{P_0} \eta_{\text{изл}} W_0, \text{ Дж/м}^2; \quad (1)$$

$$E_{sУФ-С} = \frac{E_{\max}}{P_0} \eta_{УФ-С} W_0, \text{ Дж/м}^2, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{изл}}$ и $\eta_{УФ-С}$ — КПД излучения лампы в интегральном спектре и в УФ-С диапазоне соответственно; W_0 — запасаемая электрическая энергия лампы.

При известном флюенсе в i -м спектральном диапазоне за один импульс облучения E_{si} длительность терапевтической процедуры t_i определяется так:

$$t_i = \frac{D_i}{E_{si}} \frac{1}{f}, \text{ с,}$$

где D_i — требуемая терапевтическая доза облучения, Дж/м²; f — частота повторения импульсов облучения аппарата, Гц.

Для верификации работы программы сравнивали облученность, создаваемую ламбертовским источником в форме цилиндра на нормально ориентированной площадке и рассчитанную строгими аналитическими методами, с результатами моделирования облученности в программе.

Точный фотометрический расчет дает следующее выражение облученности от ламбертовского цилиндрического источника излучения на нормально ориентированной площадке (формула Кейтца [18]):

$$E = \frac{P_0}{2\pi^2 L l} [2\alpha + \sin 2\alpha], \quad (3)$$

где P_0 — мощность излучения, испускаемого с боковой поверхности (принимали равной 1 Вт); L — длина цилиндра (принимали $L = 60$ мм); l — расстояние от оси цилиндра до площадки, мм; $\alpha = \arctg(L/2l)$ — полуугол, под которым приемник видит всю длину цилиндра (площадка расположена по центру лампы), рад.

Для сравнения в табл. 1 представлены результаты моделирования по программе TracePro и точных фотометрических расчетов облученности от модельного ламбертовского источника излучения, откуда следует, что погрешность моделирования не превышает $\sim 2\%$.

Результаты моделирования по программе TracePro и точных расчетов облученности от модельного ламбертовского источника излучения

Расстояние, мм	Максимальная облученность E_{\max} , Вт/м ²		Погрешность, %
	точный расчет	моделирование	
20	122,1	120,1	- 1,6
50	33,2	33,7	+ 1,5
100	9,6	9,6	0

Влияние форм-фактора осесимметричного отражателя. Влияние типа отражателя в форме тела вращения (осесимметричный отражатель) на энергетические и геометрические характеристики зоны облучения экрана на различной удаленности (в пределах от 0 до 100 мм) исследовали при значении коэффициента диффузного отражения рефлектора $R = 86\%$. При этом рассматривали два варианта исполнения цилиндрического тубуса — с отражающим покрытием и без него.

В качестве примера на рис. 3 представлены поля облученности экрана от отражателей различной формы при расстоянии от облучателя 50 мм (приведен вариант, когда цилиндрический тубус имел отражающее покрытие, коэффициент диффузного отражения $R = 86\%$; E_{\max} — максимальная облученность светового поля; $D_{0,5}$ — диаметр светового пятна по уровню $0,5E_{\max}$). Характеристики зон облучения от отражателей различных форм на разном расстоянии от облучателя (от среза цилиндрического тубуса) приведены в табл. 2, в скобках указаны данные для цилиндрического тубуса без отражающего покрытия.

Как следует из представленных результатов численного моделирования, наибольшей эффективностью характеризуется эллиптический отражатель: эффективность передачи энергии излучения лампы на площадку диаметром 90 мм (площадью 6400 мм²) с расстояния 50 мм составляет $\eta = 9,1\%$ при равномерности облученности $\xi \sim 53\%$. Он же обеспечивает и максимальную пиковую облученность — $E_{\max} = 14,6$ Вт/м² с расстояния 50 мм. Конический отражатель незначительно уступает ему: $\eta = 8,2\%$, $\xi \sim 51\%$ и $E_{\max} = 13,6$ Вт/м² на том же расстоянии. Следует отметить, что максимальная эффективность вывода излучения от лампы к объекту, определенная как отношение интеграла облученности по площади на срезе облучателя (т. е. при $l = 0$) к полной излучаемой лампой мощности, при коэффициентах отражения менее 86% не превышает 11%.

Моделирование показало, что отражательные свойства внутренней поверхности цилиндрического тубуса-дистанционатора оказывают существенное влияние на энергетические характеристики полей

облученности. Особенно это выражено на расстоянии до облучаемого объекта порядка и менее светового диаметра тубуса ($l \leq 55$ мм) — при использовании тубуса с поглощающими излучение стенками пиковые значения облученности и оптической эффективности облучателя на этих дистанциях уменьшаются почти в 2 раза по сравнению с тубусом с высоким коэффициентом отражения.

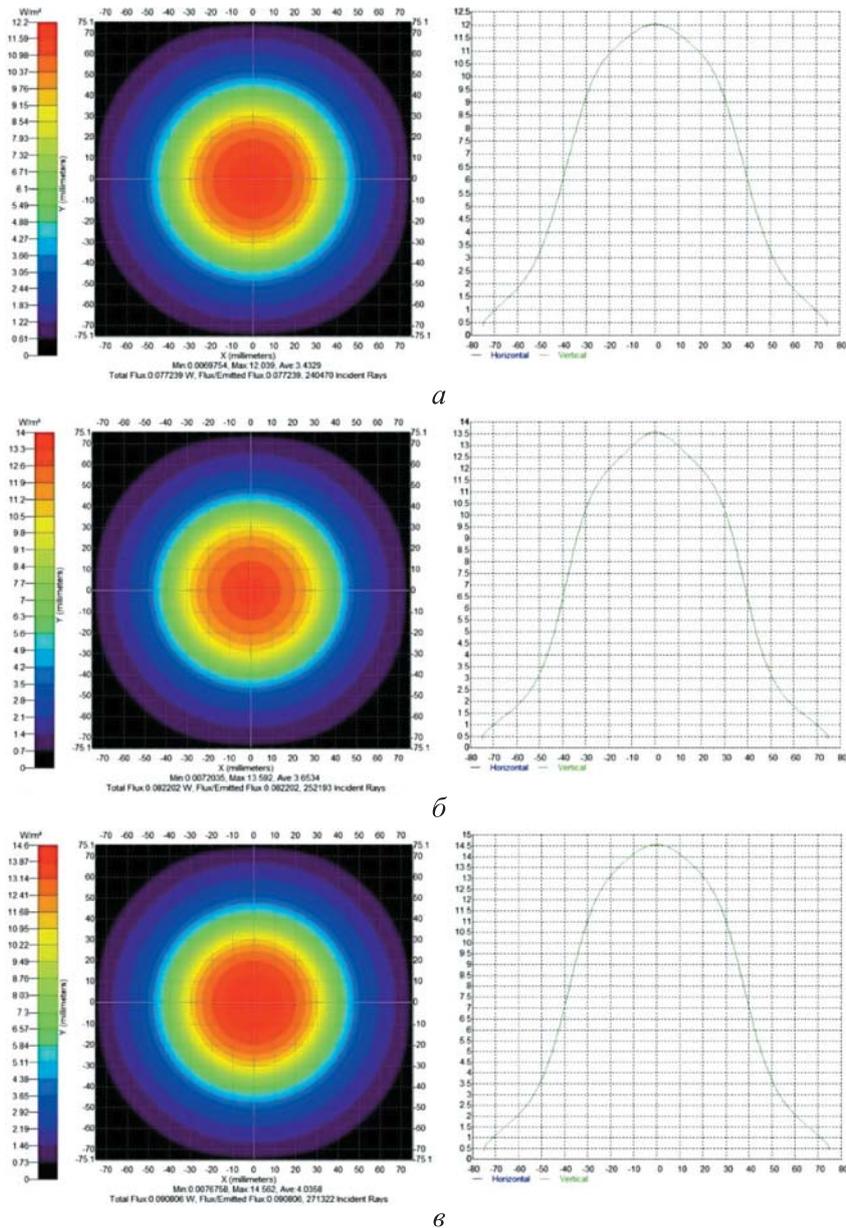


Рис. 3. Облученность экрана от отражателей различной формы ($l = 50$ мм, $R = 86\%$): *а* — цилиндр ($E_{\max} = 12,0$ Вт/м²); *б* — конус ($E_{\max} = 13,6$ Вт/м²); *в* — эллипс ($E_{\max} = 14,6$ Вт/м²). Во всех вариантах диаметр светового пятна $D_{0,5} \approx 80$ мм

Характеристики зон облучения от отражателей различной формы на разном расстоянии от облучателя

Отражатель	Расстояние, мм	E_{\max} , Вт/м ²	$D_{0,5}$, мм	η , %	ξ , %
Цилиндрический	20	26,0 (13,1)	60 (60)	9,0 (4,3)	17,6 (7,4)
	50	12,0 (7,8)	80 (80)	7,7 (4,3)	54,4 (50,1)
	100	5,2 (4,0)	110 (110)	5,5 (3,9)	80,3 (80,1)
Конический	20	28,1 (14,4)	60 (60)	9,5 (4,6)	17,9 (5,4)
	50	13,6 (8,8)	80 (80)	8,2 (4,6)	50,6 (39,6)
	100	5,9 (4,7)	110 (100)	6,0 (4,3)	81,8 (80,0)
Эллиптический	20	31,0 (16,0)	60 (60)	10,5 (5,2)	17,7 (6,1)
	50	14,6 (9,6)	80 (80)	9,1 (5,2)	53,4 (47,6)
	100	6,4 (5,0)	110 (100)	6,5 (4,7)	80,8 (79,6)

Примечание: в скобках указаны данные для цилиндрического тубуса без отражающего покрытия.

В целом анализ результатов моделирования показывает, что при диффузном характере отражения и коаксиальном расположении лампы в осесимметричном отражателе влияние геометрической формы отражателя на характеристики полей облученности не будет существенным — разброс значений максимальной облученности, эффективности передачи энергии излучения и равномерности облучения, как правило, не выше 10 % относительно средних значений. В связи с этим в качестве оптимального осесимметричного отражателя для экспериментальных образцов фототерапевтических аппаратов типа «Зарница-А» [11] рекомендован конический отражатель как более технологичный, чем эллиптический, и энергетически более эффективный по сравнению с цилиндрическим отражателем.

Для определения влияния отражения лучей от поверхности лампы на выходные светотехнические характеристики конического облучателя проведены тестовые расчеты с рассмотрением двух вариантов взаимодействия падающего на лампу излучения: 1) 100%-ное отражение и 2) 100%-ное поглощение. Расчеты выполнены для двух значений коэффициента диффузного отражения конического отражателя — 86 % и 43 %.

В результате установлено, что характер взаимодействия падающего на лампу излучения оказывает влияние на абсолютные значения облученности на объекте, но практически не влияет на относительное распределение облученности по световому пятну и на его характерные размеры. С увеличением коэффициента диффузного отражения отражателя возрастает влияние характера взаимодействия падающего на лампу излучения на амплитудные значения создаваемой отражателем облученности. При значении коэффициента диффузного отражения конического отражателя $R = 86 \%$ различие в амплитудных значениях

создаваемой отражателем облученности для случая полностью отражающей и полностью поглощающей лампы достигает 30 %; при уменьшении коэффициента диффузного отражения в 2 раза ($R = 43\%$) различие в значениях создаваемой облученности сокращается до 8 % (на расстоянии 50 мм от среза облучателя максимальные значения облученности составляют $E_{\max} = 11,89 \pm 1,81 (\pm 15\%) \text{ Вт/м}^2$ при $R = 86\%$ и $E_{\max} = 1,63 \pm 0,06 (\pm 4\%) \text{ Вт/м}^2$ при $R = 43\%$). Дальнейший анализ проведен по результатам моделирования с полностью отражающей лампой.

Расчитанные с учетом выражений (1) и (2) данные о характеристиках зоны облучения на различном расстоянии от облучателя экспериментальных образцов аппарата «Зарница-А» при использовании тубуса-дистанционатора с поглощающими и отражающими стенками приведены в табл. 3. В расчетах принимали $W_0 \approx 20 \text{ Дж}$, $\eta_{\text{изл}} = 0,5$ и $\eta_{\text{УФС}} = 0,05$ (характерные значения спектральных КПД импульсной лампы ИИП-5/60 в применяемых режимах энергопитания). В табл. 3 также представлены экспериментальные данные об измерениях, выполненных в [10, 11].

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные характеристики зон облучения на различном расстоянии от облучателя экспериментальных образцов аппарата «Зарница-А» при использовании тубуса-дистанционатора с поглощающими и отражающими стенками

Характеристика зоны облучения, Дж/м ²	Расстояние от облучателя, мм		
	20	50	100
Флюенс за один импульс в интегральном спектре: расчет эксперимент	144–281	88–136	47–59
	~ 200	~ 100	~ 50
Флюенс за один импульс в УФ-С диапазоне: расчет эксперимент	14–28	9–14	5–6
	~ 20	~ 10	~ 5

В целом можно отметить удовлетворительное соответствие результатов моделирования и эксперимента, учитывая неопределенности в реальных коэффициентах отражения рефлектора и стенок тубуса-дистанционатора.

Влияние коэффициента диффузного отражения рефлектора на световые характеристики зоны облучения. Априори ясно, что коэффициент отражения поверхности рефлектора должен заметно влиять на энергетические характеристики зоны облучения. Однако количественно такое влияние при наличии многократного отражения излучения оценить трудно. В связи с этим на примере конического отражателя проведено численное моделирование полей облученности

при вариации коэффициента диффузного отражения рефлектора в диапазоне от 10 до 100 %. Результаты моделирования при расстоянии до экрана 50 мм показаны на рис. 4.

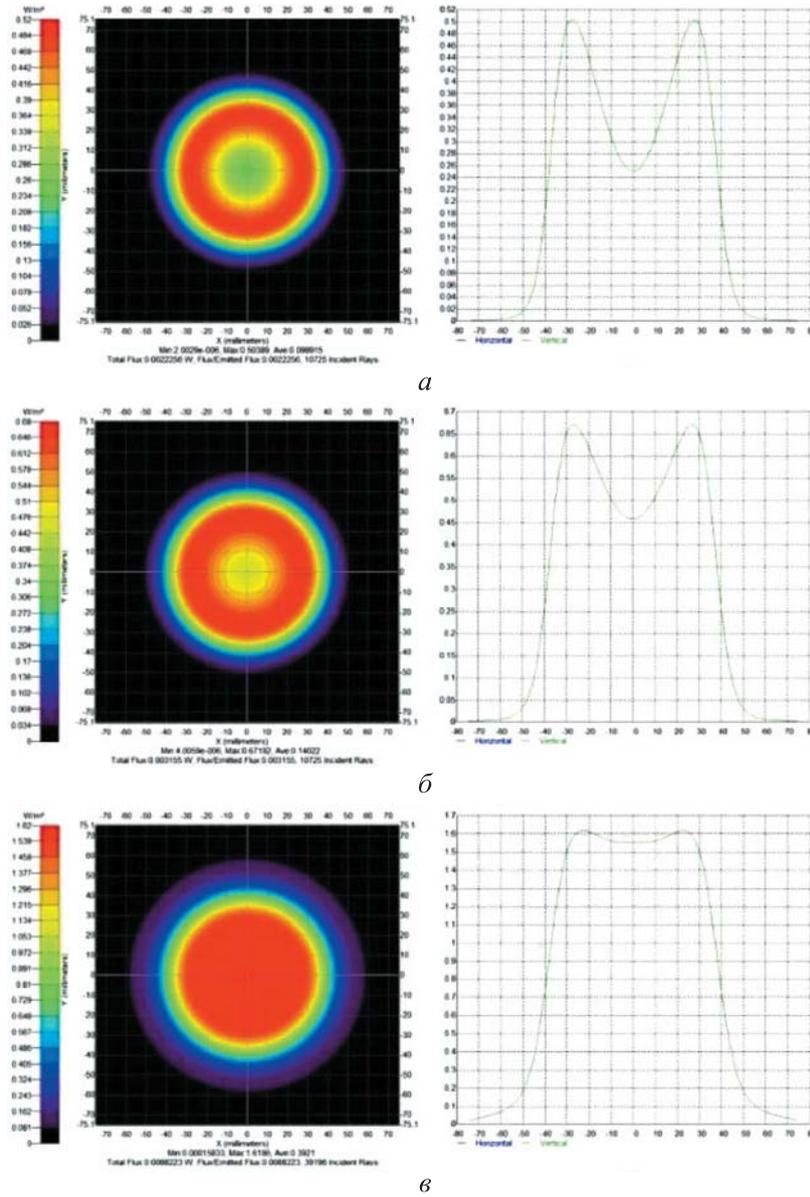


Рис. 4 (начало). Распределение облученности экрана, удаленного от облучателя на 50 мм, при различных значениях коэффициента диффузного отражения рефлектора:

$$\begin{aligned}
 а & \text{ — } R = 10 \%, E_{\max} = 0,5 \text{ Вт/м}^2; & б & \text{ — } R = 20 \%, E_{\max} = 0,7 \text{ Вт/м}^2; \\
 в & \text{ — } R = 43 \%, E_{\max} = 1,6 \text{ Вт/м}^2
 \end{aligned}$$

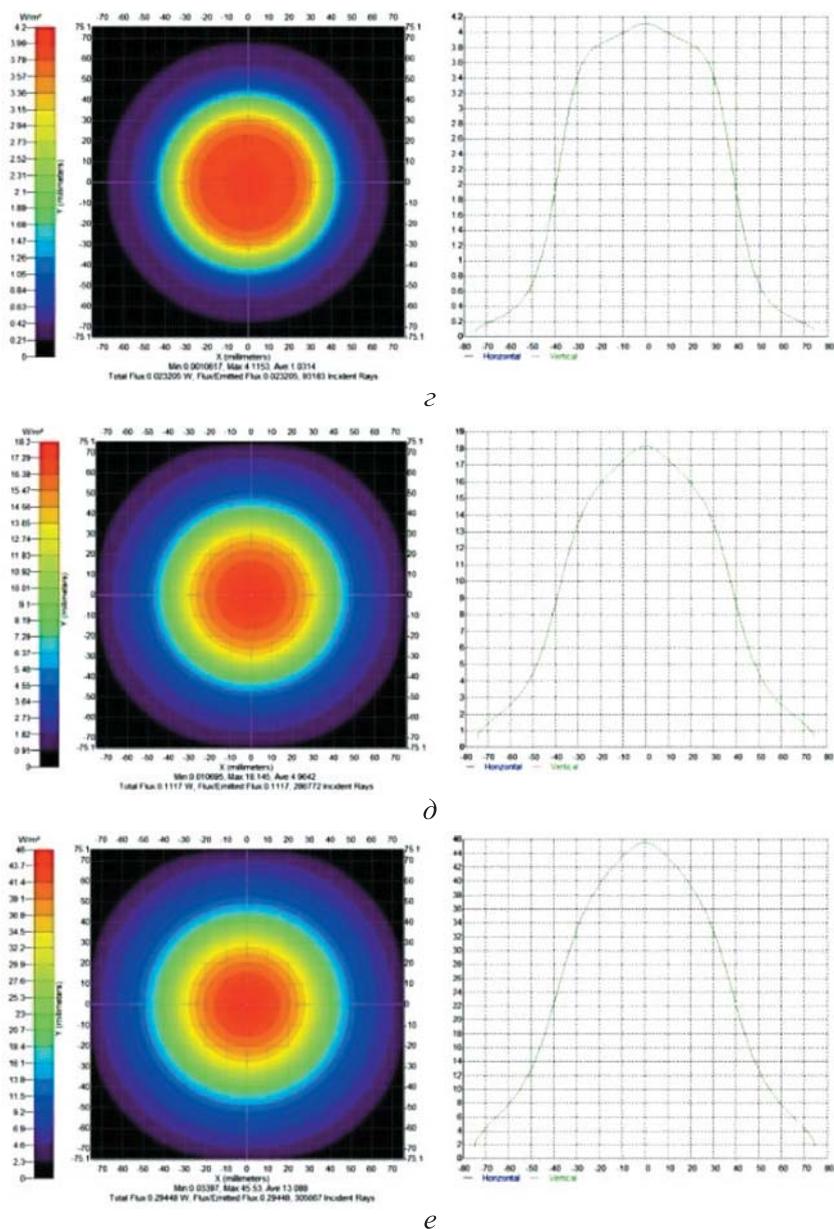


Рис. 4 (окончание). Распределение облученности экрана, удаленного от облучателя на 50 мм, при различных значениях коэффициента диффузного отражения рефлектора:

$$z — R = 65 \%, E_{\max} = 4,1 \text{ Вт/м}^2; \quad d — R = 90 \%, E_{\max} = 18,5 \text{ Вт/м}^2;$$

$$e — R = 100 \%, E_{\max} = 45,5 \text{ Вт/м}^2$$

Видно, что при коэффициентах диффузного отражения менее 40 % в центре зоны облучения наблюдается выраженный провал облученности, а в периферийных областях светового пятна имеют место максимальные значения облученности. Для того чтобы убедиться, что

такое распределение облученности не связано с особенностями работы программы, были проведены дополнительные расчеты с использованием различного количества исходных лучей, число которых варьировалось в диапазоне $n = 5 \times 10^5 \dots 2 \times 10^6$. Эти расчеты показали, что с увеличением числа моделирующих лучей в указанных пределах незначительно повышается точность вычислений, например, при $R = 10\%$ $E_{\max} = 0,512 \text{ Вт/м}^2$ при $n = 5 \times 10^5$ и $E_{\max} = 0,514 \text{ Вт/м}^2$ при $n = 2 \times 10^6$, т. е. погрешность вычислений менее 0,5%. Однако вид пространственного распределения облученности не изменяется, и, следовательно, наблюдаемое снижение облученности в центре светового пятна при малых коэффициентах отражения рефлектора обусловлено физическими факторами, а именно, снижением роли эффектов многократного отражения, которые при $R > 45\%$ вуалируют затенение центральной зоны лампой. В связи с этим при $R \geq 45\%$ наблюдается колоколообразное распределение облученности по световому пятну с максимумом в его центре.

Зависимости максимальной облученности E_{\max} , создаваемой коническим отражателем на дистанциях 20 и 50 мм, и оптической эффективности η от коэффициента диффузного отражения R представлены на рис. 5, а и б.

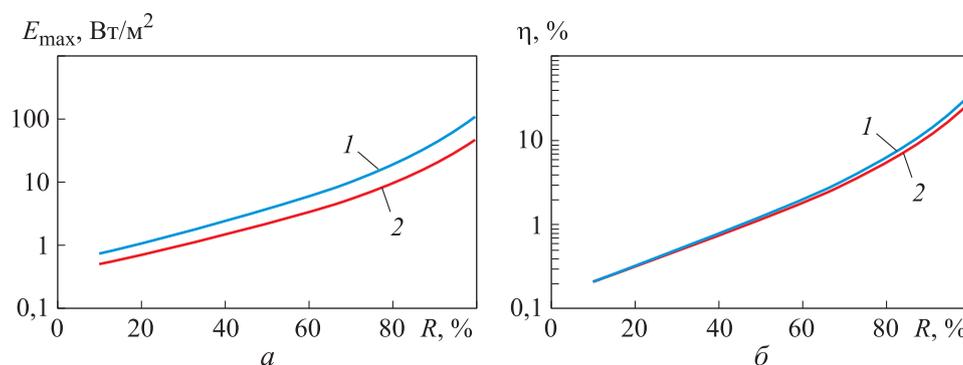


Рис. 5. Зависимости максимальной облученности E_{\max} (а) и оптической эффективности η (б) конического отражателя от коэффициента диффузного отражения R на расстоянии от облучателя до экрана 20 мм (1) и 50 мм (2)

Верхний предел данных характеристик достигается при 100%-ном диффузном отражении рефлектора. В частности, на удаленности от облучателя 50 мм максимальная облученность объекта составляет $\sim 45 \text{ Вт/м}^2$ при эффективности передачи энергии излучения лампы на площадку диаметром 90 мм, равной $\sim 30\%$. Зависимость энергетических характеристик зоны облучения от коэффициента отражения рефлектора очень сильная (при $R \geq 60\%$ величины E_{\max} и η пропорциональны R^α , где показатель степени $\alpha \sim 5,0 \pm 0,5$). При типично

реализуемых коэффициентах диффузного отражения $R = 60 \dots 90 \%$ оптическая эффективность составляет $1,5 \dots 11,0 \%$, а максимальные значения облученности на удалении 50 мм — $E_{\max} = 3 \dots 18 \text{ Вт/м}^2$ соответственно.

Коэффициент диффузного отражения R рефлектора также оказывает влияние на равномерность облучения площадки фиксированного размера — с увеличением R степень равномерности распределения облученности ξ возрастает, достигая на удалении 50 мм максимальных значений ($\xi \approx 54 \%$ для области $\varnothing 90 \text{ мм}$) при $R = 100 \%$. Следует отметить, что диаметр светового пятна, определенный по уровню половинной интенсивности $D_{0,5}$, практически не зависит от R .

Влияние форм-фактора отражателя традиционной схемы СТС.

Как указывалось выше, на втором этапе исследований были рассмотрены оптические системы, построенные по традиционной схеме осветительного устройства — отражатель перехватывает часть светового потока источника излучения, направляя его на облучаемый объект. Для выбора наиболее эффективной формы поверхности такого отражателя исследованы несколько вариантов конструктивной реализации: трапецеидальный (шесть вариаций по характерным размерам), эллиптический (два варианта) и параболический (два варианта исполнения), некоторые из них представлены на рис. 6. В случаях эллиптического и параболического отражателей лампа находится в фокусах эллипса и параболы соответственно.

При моделировании учитывали наличие в облучателе оптического окна (кварц) и цилиндрического тубуса-дистанционатора со световым диаметром 55 мм и высотой 30 мм . Принимали, что материал отражателя — анодированный алюминий с 86% диффузного отражения, тубус — с неотражающими стенками, характеристики источника излучения и параметры моделирования аналогичны рассмотренным на первом этапе. На рис. 6 напротив некоторых выбранных конструкций отражателей (наиболее эффективных) показаны полученные при численном моделировании поля облученности. В табл. 4 приведены соответствующие различным рассмотренным вариантам конструкций отражателя значения максимальной облученности, оптической эффективности и равномерности облученности в области диаметром 90 мм (на расстоянии 50 мм от среза тубуса).

Из представленных результатов численного моделирования следует, что наибольшей эффективностью характеризуется параболический отражатель ($p = 15$ в $y^2 = 2px$): максимальная облученность соответствует $E_{\max} = 19,4 \text{ Вт/м}^2$, эффективность передачи энергии излучения лампы на площадку диаметром 90 мм с расстояния 50 мм составляет $\eta = 11,4 \%$ при равномерности облученности $\xi \sim 58 \%$. Трапецеидальный-А отражатель ($A = 35 \text{ мм}$, $B = 15 \text{ мм}$, $C = 0$) незначительно уступает ему: $E_{\max} = 19,0 \text{ Вт/м}^2$, $\eta = 11,1 \%$ и $\xi \sim 54 \%$.

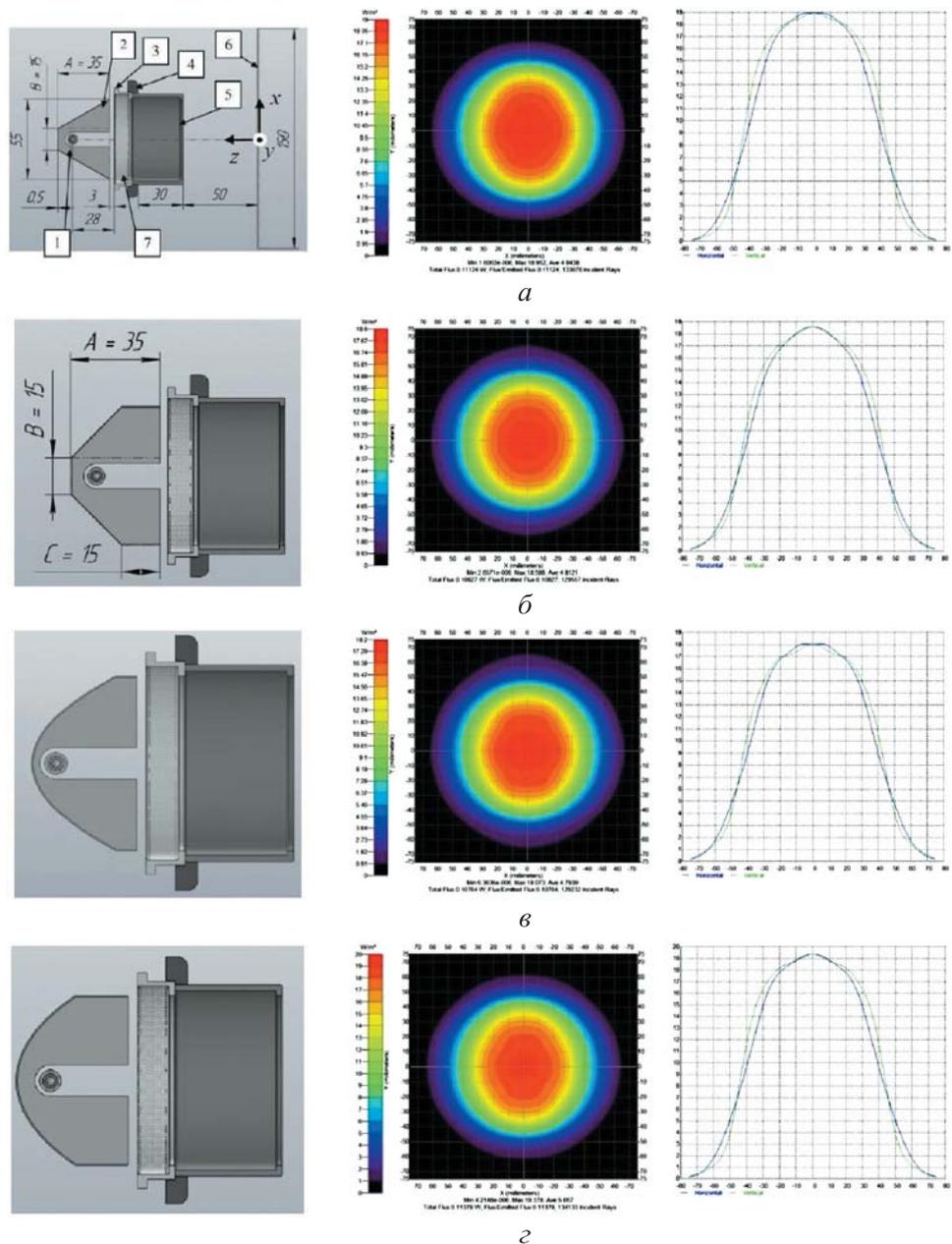


Рис. 6. Поля облученности при отражателе трапецидальном-А (а), трапецидальном-Б (б), эллиптическом (в) и параболическом (г): 1 — лампа ИНП-5/60, 2 — отражатель, 3 — крышка облучателя, 4 — насадка на крышку, 5 — тубус с выходным отверстием 55 мм, 6 — облучаемая поверхность, 7 — кварцевое окно (световой диаметр 55 мм)

Максимальная облученность, оптическая эффективность и равномерность облученности в области диаметром 90 мм на расстоянии 50 мм от облучателя при различных конструкциях отражателя

Отражатель	E_{\max} , Вт/м ²	η , %	ξ , %	$D_{0,5}$, мм
Трапецидальный-А ($A = 35$ мм, $B = 15$ мм, $C = 0$)	19,0	11,1	54,0	82
Трапецидальный-Б ($A = 35$ мм, $B = 15$ мм, $C = 15$ мм)	18,6	10,8	54,7	81
Эллиптический ($a = 170$ мм, $b = 60$ мм)	18,1	10,8	56,4	82
Параболический ($p = 15$ в $y^2 = 2px$)	19,4	11,4	57,9	80
<i>Примечание:</i> $D_{0,5}$ — диаметр светового пятна по уровню половинной интенсивности.				

В целом можно отметить, что при диффузном характере отражения влияние геометрической формы отражателя и его размеров на характеристики полей облученности не является существенным — разброс значений максимальной облученности, эффективности передачи энергии излучения и равномерности облучения не превышает 4 % ($E_{\max} = 18,8 \pm 0,6$ ($\pm 3,3\%$) Вт/м², $\eta = 11,0 \pm 0,3$ %, $\xi = 55,8 \pm 0,4$ %) относительно средних значений.

В связи с этим в качестве оптимального для опытно-промышленных образцов фототерапевтических аппаратов на основе малогабаритных импульсных ксеноновых ламп (аппараты «Зарница-М») рекомендован отражатель трапецидального профиля с $A = 35$ мм, $B = 15$ мм, $C = 0$ как более технологичный по сравнению с отражателями параболического и эллиптического профилей.

Для данного отражателя на рис. 7 представлены полученные при моделировании поля облученности на плоскости размером 150×150 мм, последовательно располагаемой на расстояниях 20 мм, 50 мм и 100 мм от среза тубуса облучателя.

По полученным в результате моделирования характеристикам зоны облучения на различном расстоянии до объекта рассчитали плотности энергии излучения (флюенсы), приходящего на поверхность за один импульс, в интегральном спектре $E_{s\Sigma}$ и в УФ-С диапазоне $E_{s\Sigma}$. Методика расчета описана выше. В расчетах, так же как и ранее, полагали КПД излучения лампы $\eta_{\text{изл}} = 0,5$ в интегральном спектре и $\eta_{\text{УФ-С}} = 0,05$ в УФ-С диапазоне, запасаемая электрическая энергия лампы $W_0 \approx 20$ Дж. Расчетные данные сравнивали с результатами экспериментальных измерений характеристик зон облучения на различном расстоянии от облучателя опытных образцов аппарата «Зарница-М».

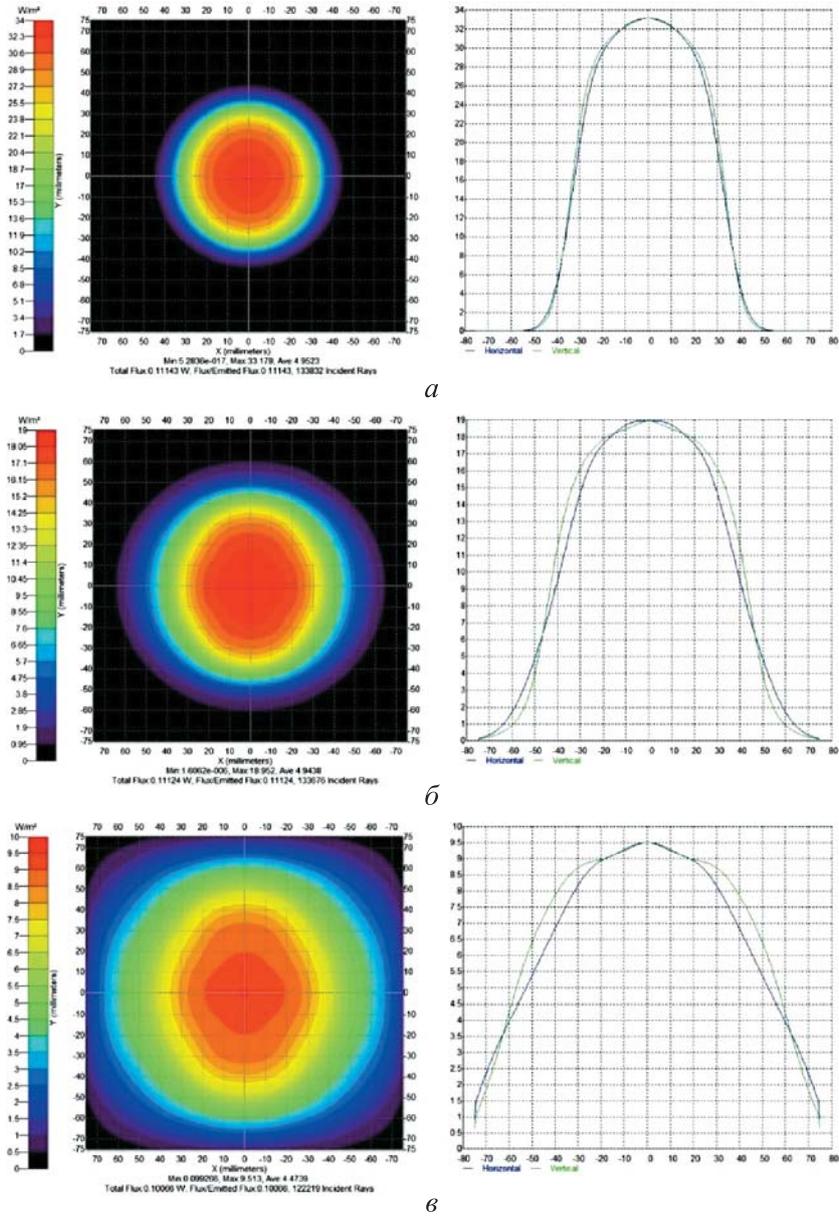


Рис. 7. Поля облученности на различном расстоянии от среза тубуса облучателя:
 а — $l = 20$ мм, $E_{\max} = 33,2$ Вт/м², $D_{0,5} = 60$ мм; б — $l = 50$ мм, $E_{\max} = 19,0$ Вт/м², $D_{0,5} = 80$ мм;
 в — $l = 100$ мм, $E_{\max} = 9,5$ Вт/м², $D_{0,5} = 110$ мм

Измерения выполнены с использованием широкодиапазонного оптоволоконного спектрометра Solar S100 с датчиком изображения S8378-1024 (производство компании Hamamatsu). Для регистрации абсолютных значений спектральной энергетической облученности использовали кварцевое оптическое волокно Ocean Optics P300-1-SR с косинусным корректором CC-3-UV-S. Совместная калибровка

оптической системы спектрометра с оптическим волокном и косинусным корректором по спектральной чувствительности проводилась с применением эталонного источника излучения DH-3P-CAL (производитель — Ocean Optics, США). Расчетные и экспериментальные характеристики зон облучения на различном расстоянии от облучателя опытных образцов аппарата «Зарница-М» приведены в табл. 5.

Таблица 5

Расчетные и экспериментальные характеристики зон облучения на различном расстоянии от облучателя опытных образцов аппарата «Зарница-М»

Характеристика зоны облучения	Расстояние от облучателя, мм			
	20	50	100	
Эффективный диаметр зоны облучения (по уровню $0,5E_{\max}$), мм:	расчет	60	80	110
	эксперимент	~ 60	~ 80	~ 110
Флюенс за один импульс в интегральном спектре, Дж/м ² :	расчет	332	190	95
	эксперимент	~ 340	~ 174	~ 97
Флюенс за один импульс в УФ-С диапазоне, Дж/м ² :	расчет	33	19	10
	эксперимент	~ 31	~ 19	~ 10

Полученные расчетные данные хорошо согласуются с результатами экспериментальных измерений. Представляет интерес сравнение значений облученности, создаваемой открытой лампой и той же лампой в составе облучателя рассмотренной конструкции на одинаковом расстоянии от оси лампы. Отношение этих значений, по существу, является коэффициентом концентрации светового потока отражателем.

Для трапецеидального отражателя расстояние от оси лампы до среза цилиндрического тубуса составляет ~ 70 мм (см. рис. 6), поэтому дистанция от тубуса до облучаемой поверхности $l = 20$ мм соответствует расстоянию от оси лампы до этой поверхности ($X = 90$ мм).

Полученные при моделировании зависимости максимальной облученности, создаваемой открытой лампой мощностью 1 Вт и трапецеидальным облучателем, от расстояния до оси лампы X представлены на рис. 8, где также приведены аппроксимационные зависимости для расстояния в диапазоне $X = 20 \dots 200$ мм. Согласно результатам расчетов, в этом диапазоне дистанций выбранный трапецеидальный облучатель увеличивает облученность на объекте в ~ 2,8 раза по сравнению с облученностью, создаваемой открытой лампой. Зависимость максимальной облученности от расстояния, отсчитываемого от среза тубуса l (мм), хорошо

описывается приближенным выражением $E_{\max} \approx 2515 / (7 + l)^2$, Вт/м², полезным для расчета доз, создаваемых аппаратами «Зарница-М» на различном расстоянии в ближней зоне ($l = 20 \dots 200$ мм).

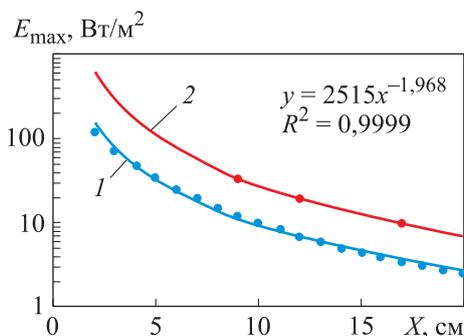


Рис. 8. Зависимость максимальной облученности E_{\max} , создаваемой открытой лампой (1) и трапециевидным облучателем (2), от расстояния до оси лампы X

Заключение. С использованием программной среды TricePro выполнены моделирование и оптимизация светотехнической системы фототерапевтических аппаратов для лечения ран и локальных инфекций. В качестве источника излучения рассмотрена малогабаритная импульсная ксеноновая лампа. Определены факторы, влияющие на эффективность передачи энергии излучения лампы к облучаемой поверхности и однородность распределения излучения по световому пятну. Показано, что при использовании диффузного отражателя его форма слабо (в пределах $\pm 10\%$) влияет на характеристики полей облученности, в связи с чем в качестве оптимальных рекомендованы форм-факторы отражателей, более технологичные в изготовлении: для осесимметричных рефлекторов — конический, для рефлекторов традиционной схемы облучения — трапециевидный.

Установлено, что коэффициент диффузного отражения рефлектора оказывает существенное влияние на энергетические характеристики зоны облучения ($E_{\max} \sim R^5$) и равномерность облученности площадки фиксированного размера, не влияя при этом на размеры светового пятна, определяемые по уровню половинной интенсивности. Рассмотрены современные отражающие материалы, перспективные для применения в светотехнических системах фототерапевтических аппаратов. Сравнение результатов численного моделирования полей облученности, создаваемых СТС различных типов, с данными прямых экспериментальных измерений показало их достаточно хорошее количественное соответствие, что свидетельствует о возможности использовать разработанный методический подход при проектировании широкого круга аппаратов для фотомедицины.

Полученные при моделировании данные позволяют по известным спектральным характеристикам лампы определять продолжительность облучения раневых поражений аппаратами импульсного широко-спектрального оптического облучения, необходимую для достижения требуемой энергетической дозы при проведении фототерапевтических процедур.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lee Ch.-R., Cho I.H., Jeong B.Ch., Lee S.H. Strategies to Minimize Antibiotic Resistance. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2013, vol. 10, pp. 4274–4305. <https://doi.org/10.3390/ijerph10094274>
- [2] Fuchs Ch., Negri L.B., Pham L., Tam J. Light-Based Devices for Wound Healing. *Current Dermatology Reports*, 2020, vol. 9, pp. 261–276. <https://doi.org/10.1007/s13671-020-00309-y>
- [3] Avci P., Gupta A., Sadasivam M., Vecchio D., Pam Z., Pam N., Hamblin M.R. Low-level laser (light) therapy (LLLT) in skin: stimulating, healing, restoring. *Semin Cutan Med Surg*, 2013, vol. 32 (1), pp. 41–52. PMID: 24049929; PMCID: PMC4126803.
- [4] Gupta A., Avci P., Dai T., Huang Y.Y., Hamblin M.R. Ultraviolet radiation in wound care: sterilization and stimulation. *Advances in Wound Care*, 2013, vol. 2, no. 8, pp. 422–436. <https://doi.org/10.1089/wound.2012.0366>
- [5] Masson-Meyers D.S., Bumahb V.V., Castelc Ch., Castelc D., Samuel E.C. Pulsed 450 nm blue light significantly inactivates *Propionibacterium acnes* more than continuous wave blue light. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*. 2020, vol. 202, p. 111719. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111719>
- [6] Sloan M. *Red Light Therapy: Miracle Medicine*. Lulu Press, 2020, 182 ps. ePID 21050090666.
- [7] Kharkwal G.B., Sharma S.K., Huang Y.-Y., Dai T., Hamblin M.R. Photodynamic therapy for infections: clinical applications. *Lasers Surg Med*, 2011, vol. 43 (7), pp. 755–767. DOI: 10.1002/lsm.21080
- [8] Камруков А.С., Козлов Н.П., Шашковский С.Г., Яловик М.С. Высокоинтенсивные плазменно-оптические технологии для решения актуальных экологических и медико-биологических задач. *Безопасность в техносфере*, 2009, № 3, с. 31–38.
- [9] Камруков А.С., Козлов Н.П., Ушаков И.Б., Шашковский С.Г. Разработка и внедрение импульсных плазменно-оптических технологий и установок в космическую медицину и практическое здравоохранение. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. «Ионно-плазменные технологии», с. 107–119.
- [10] Bagrov V.V., Bukhtiyarov I.V., Volodin L.Y., Zibarev E.V., Kamrukov A.S., Kondratiev A.V., Krylov V.I., Nikonova S.M., Novikov D.O., Semenov K.A. Preclinical studies of the antimicrobial and wound-healing effects of the high-intensity optical irradiation “Zarnitsa-A” apparatus. *Appl. Sci*, 2023, vol. 13, p. 10794. <https://doi.org/10.3390/app131910794>
- [11] Багров В.В., Бухтияров И.В., Володин Л.Ю., Зибарев Е.В., Камруков А.С., Кондратьев А.В., Крылов В.И., Никонова С.М., Новиков Д.О., Семенов К.А. Аппарат высокоинтенсивного оптического облучения для терапии ран и раневой инфекции. *Медицинская техника*, 2023, № 2, с. 1–4.
- [12] Звелто О. *Принципы лазеров*. Москва, Мир, 1990, 560 с.
- [13] Reflective-surfaces. *Alanod.com*. Официальный сайт

- URL: <https://alanod.com/en/products/our-surfaces/reflective-surfaces> (дата обращения: 26.10.2024).
- [14] UV Applications. *Alanod-Westlake.com*. Официальный сайт URL: https://virteomdevcdn.blob.core.windows.net/site-alanod-westlake-com/uploaded_media/alanod-westlake_com/Brochures/UVApplicationsBrochure2022__1667931930.pdf (дата обращения: 26.10.2024).
- [15] Листы из ПТФЭ с высоким коэффициентом отражения ThorLabs. *Азимут фотоникс*. Официальный сайт URL: <https://azimp.ru/thorlabs/high-reflectance-ptfe-sheets> (дата обращения: 26.10.2024).
- [16] Разработки и новые материалы. *Формопласт*. Официальный сайт URL: <https://www.formoplast-spb.ru/?ysclid=m2qfihkfv6686396996> (дата обращения: 26.10.2024).
- [17] Kim S.-Y., Lee H.-Y., Jun W.-K., Kang D.-H., Jo Y.-J., Jung M.-S. Reflector design to improve the uniformity of an irradiated area using a xenon flash lamp. *Korean Journal of Optics and Photonics*, 2019, vol. 30, no. 5, pp. 197–203.
- [18] Keitz H.A.E. Non-point sources. In: *Light Calculations and Measurements*. Palgrave, London, Philips Technical Library, 1971. https://doi.org/10.1007/978-1-349-00012-8_9

Статья поступила в редакцию 13.11.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Камруков А.С., Карначев К.Л., Кондратьев А.В., Нащёкина Ю.А. Моделирование и оптимизация форм-фактора светотехнических систем медицинских аппаратов для широкоспектральной фототерапии ран. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 3. EDN SQYFNZ

Камруков Александр Семенович — доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий отделом НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 200 научных работ в области радиационной плазмодинамики и плазменно-оптических технологий. e-mail: kamrukov@bmstu.ru

Карначев Кирилл Леонидович — магистрант кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: karnachevkl@student.bmstu.ru

Кондратьев Андрей Валерьевич — ведущий инженер отдела НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор 15 научных работ в области экологических и медицинских плазменно-оптических технологий. e-mail: kondratyev.av@bmstu.ru

Нащёкина Юлия Алексеевна — бакалавр кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: junaschekina@student.bmstu.ru

Simulation and optimization of a medical device lightning system form factor in the wound wide-spectrum phototherapy

© A.S. Kamrukov, K.L. Karnachev, A.V. Kondratyev, Yu.A. Nashchekina

Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

Using the TracePro software environment, the paper presents results of simulating and optimizing the phototherapeutic device lighting systems in treating the wounds and localized infections. It considers a pulsed xenon lamp as the radiation source. The paper determines factors affecting the energy transfer efficiency and the radiation distribution uniformity over the light spot. It indicates that the diffuse reflector shape insignificantly affects characteristics of the irradiation fields. In this regard, the reflector conical and trapezoidal form factors are recommended as optimal being the most technologically advanced in manufacture. The paper shows that the reflector diffuse reflection coefficient significantly affects the irradiation zone energy characteristics and the irradiation uniformity without changing the light spot size. Modern reflective materials for the phototherapeutic devices are considered. Results of irradiation field numerical simulation are compared with the data of direct experimental measurement, and their good agreement is shown. This makes it possible to recommend using the developed methodological approach in designing the photomedicine devices. Based on the known lamp spectral characteristics, the simulation data obtained allow determining the irradiation time for the wound lesions and necessary to achieve the required energy dose during the phototherapeutic procedures.

Keywords: wound treatment, optical radiation, continuous spectrum, pulsed xenon lamp, phototherapeutic device, lighting system, numerical simulation, optimization

REFERENCES

- [1] Lee Ch.-R., Cho I.H., Jeong B.Ch., Lee S.H. Strategies to Minimize Antibiotic Resistance. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2013, vol. 10, pp. 4274–4305. <https://doi.org/10.3390/ijerph10094274>
- [2] Fuchs Ch., Negri L.B., Pham L., Tam J. Light-Based Devices for Wound Healing. *Current Dermatology Reports*, 2020, vol. 9, pp. 261–276. <https://doi.org/10.1007/s13671-020-00309-y>
- [3] Avci P., Gupta A., Sadasivam M., Vecchio D., Pam Z., Pam N., Hamblin M.R. Low-level laser (light) therapy (LLLT) in skin: stimulating, healing, restoring. *Semin Cutan Med Surg*, 2013, vol. 32 (1), pp. 41–52. PMID: 24049929; PMCID: PMC4126803.
- [4] Gupta A., Avci P., Dai T., Huang Y.Y., Hamblin M.R. Ultraviolet Radiation in Wound Care: Sterilization and Stimulation. *Advances in Wound Care*, 2013, vol. 2, no. 8, pp. 422–436. <https://doi.org/10.1089/wound.2012.0366>
- [5] Masson-Meyers D.S., Bumahb V.V., Castelc Ch., Castelc D., Samuel E.C. Pulsed 450 nm blue light significantly inactivates *Propionibacterium acnes* more than continuous wave blue light. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*, 2020, vol. 202, p. 111719. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111719>
- [6] Sloan M. *Red Light Therapy: Miracle Medicine*. Lulu Press, 2020, 182 ps. ePID 21050090666.

- [7] Kharkwal G.B., Sharma S.K., Huang Y.-Y., Dai T., Hamblin M.R. Photodynamic therapy for infections: clinical applications. *Lasers Surg Med.*, 2011, vol. 43 (7), pp. 755–767. <https://doi.org/10.1002/lsm.21080>
- [8] Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Shashkovskiy S.G., Yalovik M.S. Vysokointensivnye plazmenno-opticheskie tekhnologii dlya resheniya aktualnykh ekologicheskikh i mediko-biologicheskikh zadach [High-intensity plasma-optical technologies for solving the urgent environmental and medical-biological problems]. *Bezopasnost v tekhnosfere — Safety in Technosphere*, 2009, no. 3, pp. 31–38.
- [9] Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Ushakov I.B., Shashkovskiy S.G. Razrabotka i vnedrenie impulsnykh plazmenno-opticheskikh tekhnologiy i ustanovok v kosmicheskuyu meditsinu i prakticheskoe zdravookhranenie [Development and implementation of pulsed plasma-optical technologies and installations in space medicine and practical healthcare]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2011, Special edition “Ion and plasma technologies”, pp. 107–119.
- [10] Bagrov V.V., Bukhtiyarov I.V., Volodin L.Y., Zibarev E.V., Kamrukov A.S., Kondratyev A.V., Krylov V.I., Nikonova S.M., Novikov D.O., Semenov K.A. preclinical studies of the antimicrobial and wound-healing effects of the high-intensity optical irradiation “Zarnitsa-A” apparatus. *Appl. Sci*, 2023, vol. 13, art. no. 10794. <https://doi.org/10.3390/app131910794>
- [11] Bagrov V.V., Bukhtiyarov I.V., Volodin L.Yu., Zibarev E.V., Kamrukov A.S., Kondratyev A.V., Krylov V.I., Nikonova S.M., Novikov D.O., Semenov K.A. Apparat vysokointensivnogo opticheskogo oblucheniya dlya terapii ran i ranevoy infektsii [High intensity optical irradiation device for wound and wound infection therapy]. *Meditsinskaya tekhnika — Biomedical Engineering*, 2023, no. 2, pp. 1–4.
- [12] Svelto O. *Principles of lasers*. Springer, 1982 [In Russ.: Zvelto O. Printsipy lazerov. Moscow, Mir Publ., 1990, 560 p.].
- [13] Reflective-surfaces. *Alanod.com* Available at: <https://alanod.com/en/products/our-surfaces/reflective-surfaces> (accessed October 26, 2024).
- [14] UV Applications. *Alanod-Westlake.com* Available at: https://virteomdevcdn.blob.core.windows.net/site-alanod-westlake-com/uploaded_media/alanod-westlake_com/Brochures/UVApplicationsBrochure2022_1667931930.pdf (accessed October 26, 2024).
- [15] ThorLabs sheets made of PTFE with high reflectance. *Azimuth Photonics* Available at: <https://azimp.ru/thorlabs/high-reflectance-ptfe-sheets> (accessed October 26, 2024).
- [16] Development and New Materials. *Formoplast* Available at: <https://www.formoplast-spb.ru/?ysclid=m2qfihkfv6686396996> (accessed October 26, 2024).
- [17] Kim S.-Y., Lee H.-Y., Jun W.-K., Kang D.-H., Jo Y.-J., Jung M.-S. Reflector design to improve the uniformity of an irradiated area using a Xenon flash lamp. *Korean Journal of Optics and Photonics*, 2019, vol. 30, no. 5, pp. 197–203.
- [18] Keitz H.A.E. Non-point sources. *Light Calculations and Measurements*. Philips Technical Library, Palgrave, London, 1971. https://doi.org/10.1007/978-1-349-00012-8_9

Kamrukov A.S., Associate Professor, Department of Plasma Power Plants, Bauman Moscow State Technical University; Head of the Department of the Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 200 scientific papers in radiation plasmodynamics and plasma-optical technologies. e-mail: kamrukov@bmstu.ru

Karnachev K.L., Master Student, Department of Plasma Power Plants, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: karnachevkl@student.bmstu.ru

Kondratyev A.V., Leading Engineer, Department of the Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University; author of 15 scientific papers in ecological and medical plasma-optical technologies. e-mail: kondratyev.av@bmstu.ru

Nashchekina Yu.A., Bachelor, Department of Plasma Power Plants, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: junaschekina@student.bmstu.ru