

## **ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ СВЕТОДИОДОВ В ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЯХ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА КАБИН МОБИЛЬНЫХ МАШИН**

*Предлагается перспективный способ очистки воздуха кабин мобильных машин от угарного газа и паров органических веществ с помощью фотокаталитического воздухоочистителя на основе ультрафиолетовых светодиодов.*

*Ключевые слова: фотокатализ, воздухоочистка, светодиод, ультрафиолетовые лучи.*

*A.V. Zaynishev, G.A. Polunin*

## **APPLICATION OF ULTRAVIOLET LIGHT-EMITTING DIODES IN PHOTOCATALYTIC AIR CLEANERS FOR AIR CLEANING CABINS OF MOBILE MACHINES**

*The article considers the promising way of air cleaning cabins of mobile machines from carbon monoxide and vapors of organic substances with the help of photocatalytic air cleaner on the basis of the ultraviolet light-emitting diode.*

*Key words: photocatalysis, air purification, light-emitting diode, ultraviolet rays.*

При работе двигателей внутреннего сгорания образуется, кроме углекислого газа и паров воды, целый ряд соединений, в том числе опасных для организма человека. В первую очередь, опасность представляют угарный газ (оксид углерода), а также летучие органические соединения.

Если так называемые "хлопья сажи" можно задержать с помощью воздушных фильтров грубой очистки (например, сеточных), а мелкие частички – с помощью фильтров тонкой очистки (НЕРА-фильтров), то газообразные примеси удалить из воздуха очень сложно. На сегодняшний день существует всего четыре типа противогазовых фильтрующих устройств – на основе активированного угля, на основе химических катализаторов, термokatалитические и фотокаталитические [1]. Появившиеся в свободной продаже в 90-е годы XX века фотокаталитические воздухоочистители имеют ряд преимуществ перед другими конструкциями [1, 2].

На современном этапе развития науки фотокатализ определяют как "изменение скорости или возбуждение химических реакций под действием света в присутствии веществ (фотокатализаторов), которые поглощают кванты света и участвуют в химических превращениях участников реакции, многократно вступая с ними в промежуточные взаимодействия и регенерируя свой химический состав после каждого цикла таких взаимодействий" [2].

Фотокатализ играет важнейшую роль в живой природе. Так, процесс фотосинтеза, обеспечивающий жизнь на Земле, фотокаталитический. На современном этапе развития систем очистки воды и воздуха от органических примесей в качестве фотокатализатора (иначе говоря, свето-катализатора) используют исключительно  $\text{TiO}_2$  (рис. 1) [3].

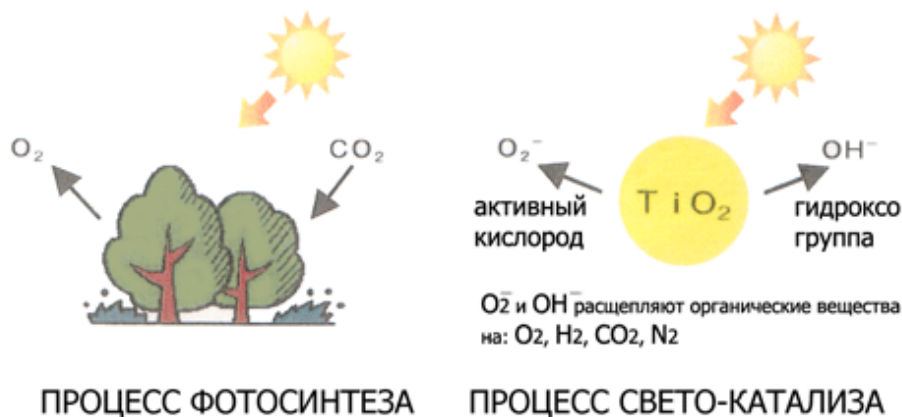


Рис. 1. Фотокаталитические процессы в природе

Диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ) – полупроводниковое соединение. Согласно современным представлениям, в таких соединениях электроны могут находиться в двух состояниях: свободном и связанном. Для перевода электрона из связанного состояния в свободное необходимо затратить энергию не менее 3,2 эВ. Эта энергия может быть доставлена квантами света с длиной волны  $\lambda < 390 \text{ нм}$ . Таким образом, при поглощении света в объёме частицы  $\text{TiO}_2$  рождаются свободный электрон и электронная вакансия ("дырка").

Электрон и дырка – достаточно подвижные образования, и, двигаясь в частице полупроводника, часть из них рекомбинирует, а часть выходит на поверхность и захватывается ею. Схематически процессы, происходящие на частице  $\text{TiO}_2$ , изображены на рис. 2.

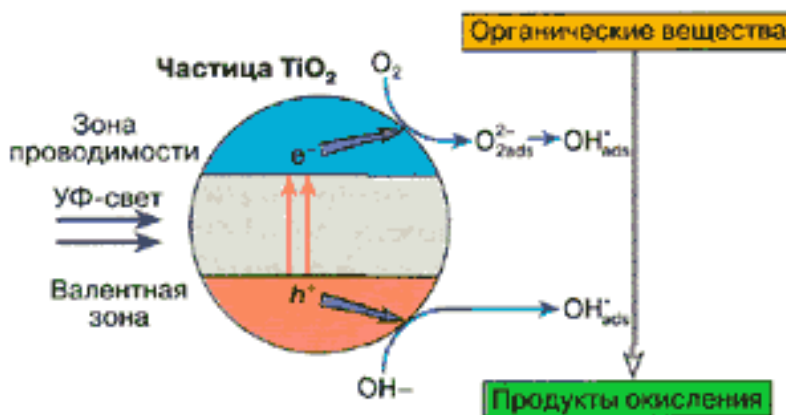
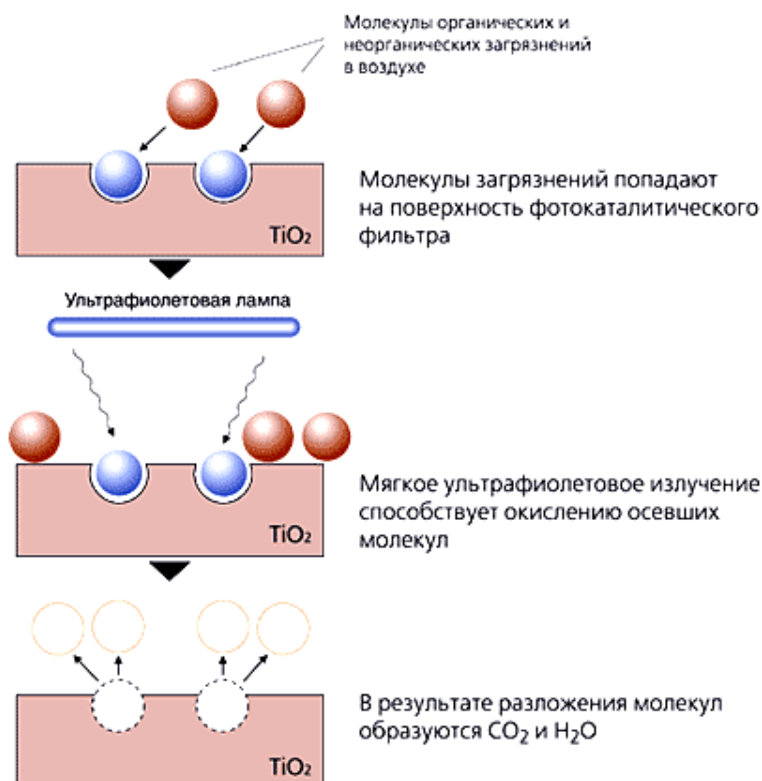


Рис. 2. Схематическое изображение процессов, идущих на полупроводниковой частице

При этом могут образовываться такие мощные окислители, как  $O\cdot$  и  $OH\cdot$ -радикал. Основным каналом исчезновения электрона являются реакции с кислородом. Дырка же реагирует либо с водой, либо с любым адсорбированным органическим (в некоторых случаях и неорганическим) соединением.  $OH\cdot$ -радикал или  $O\cdot$  также способны окислить любое органическое соединение. Следовательно, поверхность  $TiO_2$  под светом становится сильнейшим окислителем.

Таким образом, в фотокаталитических воздухоочистителях осевшие на поверхность  $TiO_2$  органические молекулы окисляются до  $CO_2$  и  $H_2O$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Принцип действия фотокаталитических воздухоочистителей

К настоящему времени доказано, что на поверхности  $TiO_2$  могут быть окислены (минерализованы) до  $CO_2$  и  $H_2O$  практически любые органические соединения [4]. Если в состав соединений входят азот или атомы галогена  $X$ , то в продуктах реакции будут наблюдаться  $HNO_3$  и  $HX$ , что заставляет использовать постфильтры из активированного угля. Единственным известным примером соединения, которое не подвергается на поверхности  $TiO_2$  окислению под действием ультрафиолетовых лучей, является тетрахлорметан, но данное соединение не образуется при работе двигателей внутреннего сгорания [3].

На практике любой фотокаталитический очиститель воздуха включает в себя пористый носитель с нанесенным  $TiO_2$ , который облучается ультрафиолетовыми лучами и через который продувается воздух. Фотокатализ разрушает вещества, проникающие даже через фильтры на основе активированного угля (армейский противогаз, гражданские противогазы ГП-5, ГП-7 и др.). Вещество-

катализатор (диоксид титана) не расходуется и не требует замены. Оно лишь ускоряет естественный процесс – разложение сложных веществ на углекислый газ и воду, который в обычных условиях занимает миллионы лет. При фотокатализе вредные примеси не накапливаются в фильтре и не возвращаются обратно в воздух, а сразу разлагаются на безопасные компоненты.

Единственным недостатком фотокатализа является образование пероксидных соединений (например, оксидов азота), которые часто встречаются среди "осколков" не до конца разложившихся молекул. Но они гораздо безвреднее озона, который при фотокатализе не образуется в принципе.

Фотокатализ пригоден для бытового использования, поскольку может происходить при комнатной температуре. К примеру, термokatалитический способ разрушения вредных веществ требует предварительного нагрева воздуха до температуры свыше 200 °С [1].

На рис. 4 показано устройство бытового фотокаталитического очистителя воздуха, разработанного Информационно-технологическим институтом (Москва) и Институтом катализа Сибирского отделения РАН.

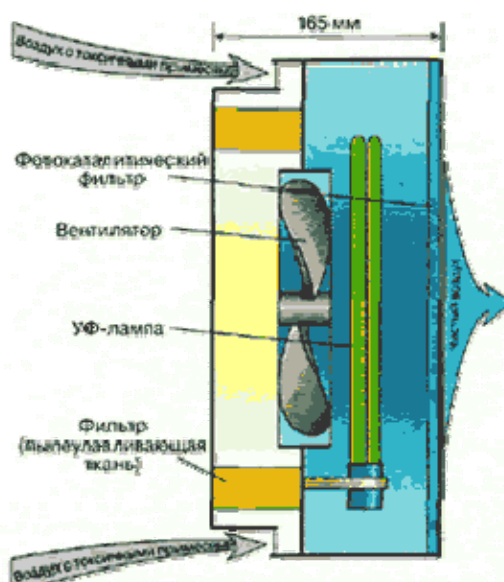


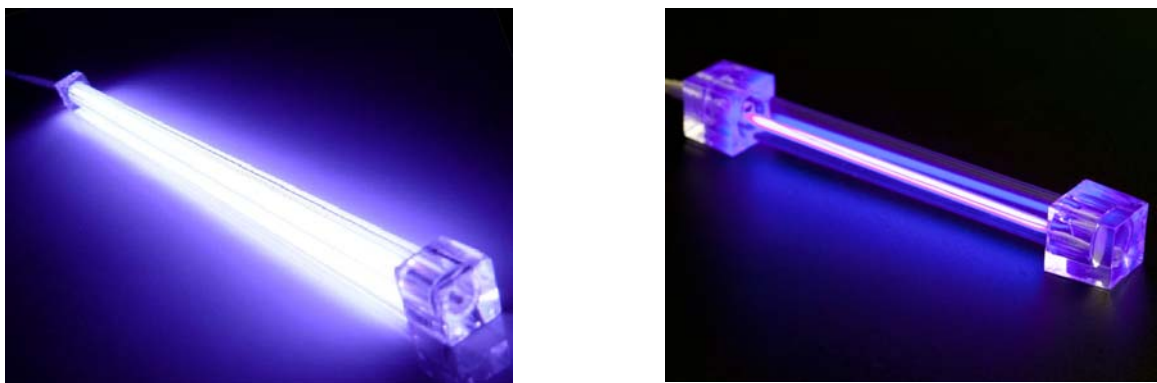
Рис. 4. Бытовой фотокаталитический очиститель воздуха

Органические молекулы из потока адсорбируются на поверхности фотокатализатора, нанесенного на пористое стекло (фотокатализаторный фильтр), и окисляются до углекислого газа и воды под действием света от УФ-лампы. Фактически фотокатализ дает уникальную возможность глубоко окислять органические соединения в мягких условиях, а простота самих устройств позволяет надеяться на прекрасные перспективы использования фотокатализа на практике. В настоящее время разнообразные модели фотокаталитических очистителей воздуха выпускают такие известные фирмы, как "Toshiba", "Sharp", "Daikin", "Bork".

Недостатком любого фотокатализатора является снижение его эффективности при наличии в очищаемом воздухе пыли. Именно поэтому большинство фотокаталитических воздухоочистителей имеет в своем составе также НЕРА-фильтры или электростатические предфильтры, способные задерживать различные механические загрязнения.

Но если сам метод является относительно безвредным, то изделия на основе фотокатализа (те же воздухоочистители) представляют опасность при утилизации, так как в их конструкции имеются ртутьсодержащие приборы – ультрафиолетовые лампы.

Ультрафиолетовые лампы – газоразрядные источники ультрафиолетовых лучей – достаточно хрупкие и недолговечные изделия (рис. 5). Средний срок службы люминесцентной ультрафиолетовой лампы составляет 5000 ч. Конечно, это почти в 10 раз превышает срок службы ламп накаливания, но не идёт ни в какое сравнение со сроком службы, к примеру, светодиодов.



**Рис. 5.** Ультрафиолетовые газоразрядные лампы

Как указывалось выше, все без исключения газоразрядные ультрафиолетовые лампы содержат ртуть (в дозах от 1 до 70 мг, в зависимости от мощности). При повреждении корпуса лампы создается угроза жизни и здоровью людей, находящихся поблизости. Лампы, у которых истек срок эксплуатации, подлежат демеркуризации – а это достаточно дорогостоящая процедура.

Вышеуказанные проблемы не позволяют использовать газоразрядные ультрафиолетовые лампы в мобильных машинах, подвергающихся вибрации, различным ускорениям и ударам. Поэтому в качестве источника ультрафиолетовых лучей для фотокатализатора авторы предлагают использовать ультрафиолетовые светодиоды.

Ранее использование светодиодов было ограничено достаточно узким спектром излучений, которые позволяли генерировать данные изделия. Как было доказано в многочисленных экспериментах, наиболее эффективным для фотокатализаторов на основе диоксида титана является ультрафиолетовое излучение поддиапазонов А и В (длина волны от 280 до 400 нм) – при этом экстремум степени очистки воздуха достигается при длине волны 320 нм [2-4]. На сего-



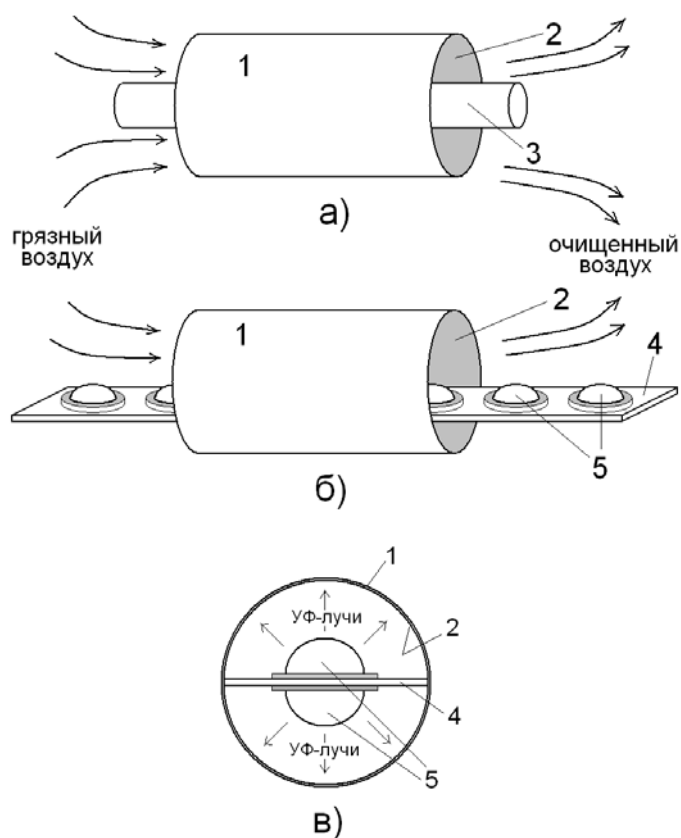
дняшний день промышленность освоила выпуск светодиодов, излучающих ультрафиолетовые лучи (УФ-лучи) с данными длинами волн.

Светодиод (светоизлучающий диод) – это полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом или контактом металл-полупроводник, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока. Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра, его спектральные характеристики зависят в том числе от химического состава использованных в нём полупроводников. Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн. К примеру, для ультрафиолетового излучения требуется использовать нитрид галлия (GaN) или нитрид бора (BN).

Светодиод, в отличие от газоразрядной лампы (рис. 5), является точечным источником света. Поэтому для повышения эффективности работы конструируемого светодиодного фотокаталитического воздухоочистителя необходимо использовать ряд из нескольких светодиодов. Отечественная и зарубежная промышленность в настоящее время выпускает так называемые "светодиодные ленты", в том числе ультрафиолетовые. На гибкой нетокопроводящей ленте в один или два ряда монтируются светодиоды, расположенные на одинаковом расстоянии друг от друга. Лента содержит токопроводящие дорожки, по которым электрическое напряжение подается на каждый светодиод. Удобство ленты состоит в том, что при выходе из строя одного или нескольких светодиодов остальные продолжают работать.

Авторами предлагается использовать светодиодную ленту в так называемом "трубчатом фотокаталитическом воздухоочистителе". В данной конструкции диоксид титана наносится на внутреннюю поверхность полой трубки одинакового по всей длине сечения – технологичнее всего сечение в виде окружности (рис. 6, а). При использовании в качестве источника ультрафиолетовых лучей газоразрядной лампы светильник (трубка из кварцевого стекла) располагается по оси воздухоочистителя и равномерно облучает всю внутреннюю поверхность, покрытую слоем диоксида титана (см. рис. 6, а).

При замене газоразрядной лампы на светодиодную ленту ультрафиолетовые лучи будут попадать только на часть поверхности, расположенную непосредственно над лентой (поверхность под лентой в этом случае является нерабочей) (рис. 6, б). Таким образом, коэффициент использования рабочей поверхности воздухоочистителя снижается. Однако увеличить данный коэффициент можно с помощью двойной (двухсторонней) светодиодной ленты – у нее светодиоды расположены с обеих сторон. В этом случае светодиодная лента должна иметь ширину, равную или несколько меньшую, чем внутренний диаметр трубчатого воздухоочистителя. Тогда светодиоды будут освещать практически всю внутреннюю поверхность устройства, за исключением двух полос, которые будут закрыты краями самой ленты (рис. 6, в).



**Рис. 6.** Трубчатый фотокаталитический воздухоочиститель:  
 а – с газоразрядной лампой; б – с односторонней светодиодной лентой;  
 в – с двухсторонней светодиодной лентой:  
 1 – корпус воздухоочистителя; 2 – внутренняя поверхность корпуса, покрытая слоем  $TiO_2$ ; 3 – газоразрядная лампа;  
 4 – светодиодная лента; 5 – отдельные светодиоды

При использовании односторонней ленты можно уменьшить габариты воздухоочистителя. Поскольку светодиодная лента, в отличие от газоразрядной лампы, способна свободно изгибаться в нескольких плоскостях, трубчатый воздухоочиститель можно, к примеру, изготовить в виде спирали – очищаемый воздух будет при этом идти от центра спирали к её краю, "омывая" за счёт центробежной силы ту часть внутренней поверхности изделия, которая облучается ультрафиолетовыми лучами. В данном случае будет частично решена проблема сниженного коэффициента использования рабочей поверхности воздухоочистителя.

Еще одной проблемой при изготовлении фотокаталитического воздухоочистителя со светодиодной лентой является увеличение так называемого "полезного облучения". "Полезное облучение" характеризует количество ультрафиолетовых лучей от отдельного светодиода, которое достигает облучаемого участка. Эта та часть потока УФ-лучей, которая эффективно направляется на рабочую поверхность без учёта потерь излучения. В данном случае рабочей поверхностью является внутренняя поверхность полой трубки, покрытая слоем диоксида титана.

Потери излучения могут возникать по трем причинам:

- УФ-лучи частично загораживаются или рассеиваются корпусом отдельного светодиода;
- УФ-лучи излучаются в неправильном направлении из-за неверной ориентации светодиодов;
- поток излучения ослабляется из-за загрязнённости или запыленности светоизлучающей поверхности светодиода [5].

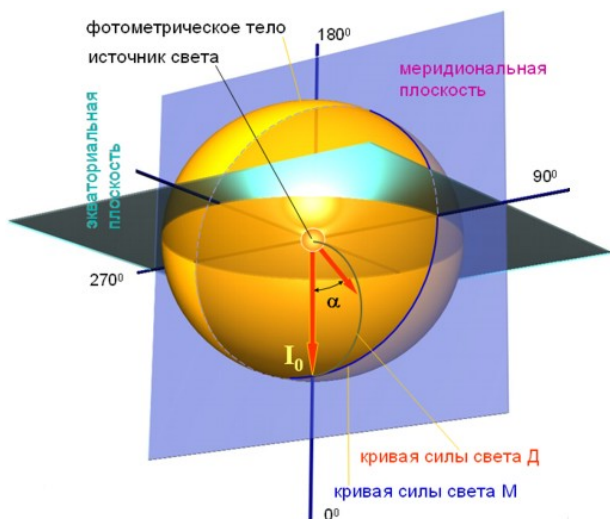
Что касается третьей причины, то, как указывалось выше, у любого фотокаталитического воздухоочистителя должен быть предфильтр, очищающий воздух от пыли, которая снижает эффективность работы фотокатализатора. Следовательно, данный предфильтр позволит избавиться и от проблемы загрязнения светоизлучающих поверхностей. Первые две проблемы могут быть решены правильным подбором типа светодиодов.

Очевидно, что при размещении на ленте отдельных светодиодов на некотором расстоянии друг от друга возможно возникновение так называемых "мертвых зон", то есть участков внутренней поверхности трубчатого воздухоочистителя, которые получают относительно малый поток УФ-лучей. "Мертвые зоны" будут тем шире, чем больше расстояние между отдельными светодиодами. Конечно, светодиоды, в отличие от традиционных точечных светильников (например, на основе ламп накаливания), являются направленными и излучают свет (в нашем случае – УФ-лучи) без использования светофильтров, а также без дополнительной фокусировки и экранирования. Следовательно, потери света у них гораздо ниже, чем у традиционного оборудования. Тем не менее, при выборе светодиодов необходимо, в первую очередь, рассматривать их *кривые силы света (КСС)*.

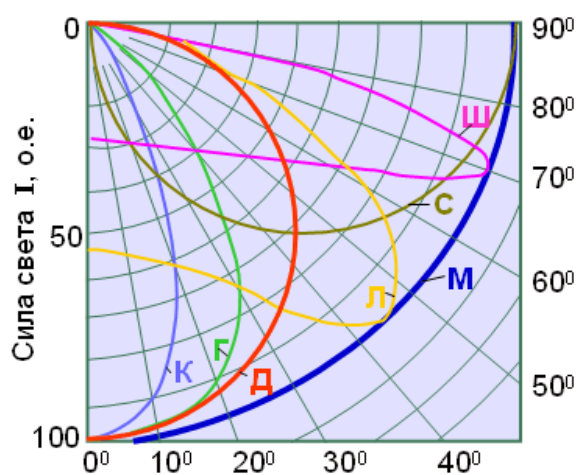
Кривая силы света (согласно ГОСТ 17677–82) – график зависимости силы света от направления в полярных координатах (рис. 7) [6]. Под КСС понимается график зависимости силы света отдельного светодиода от меридиональных и экваториальных углов, получаемый сечением его фотометрического тела плоскостью. Следовательно, КСС описывает, как именно исходящий свет распределяется в пространстве. Всё многообразие существующих источников света можно представить как вариации двух крайних состояний – свет может исходить от источника в виде узкого пучка либо охватывать широкое пространство. Большинство светодиодов и светодиодных светильников занимает промежуточное положение между этими двумя крайностями.

Поскольку мы рассматриваем симметричные источники света, то для них существует семь типов КСС (рис. 8, табл. 1). Чем шире поперечное распределение светового потока, тем сильнее он будет рассеиваться. С другой стороны, чем сильнее КСС вытянута вдоль вертикальной оси, тем сильнее будет освещен центр светового пятна, а рассеивание будет меньше (рис. 9, а-г).





**Рис. 7.** Получение кривой силы света сечением фотометрического тела источника света

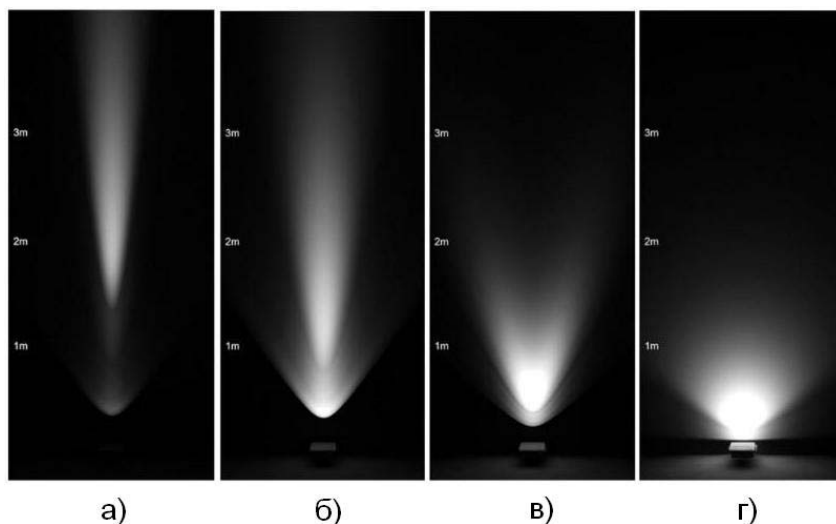


**Рис. 8.** Семь типов кривой силы света

Таблица 1

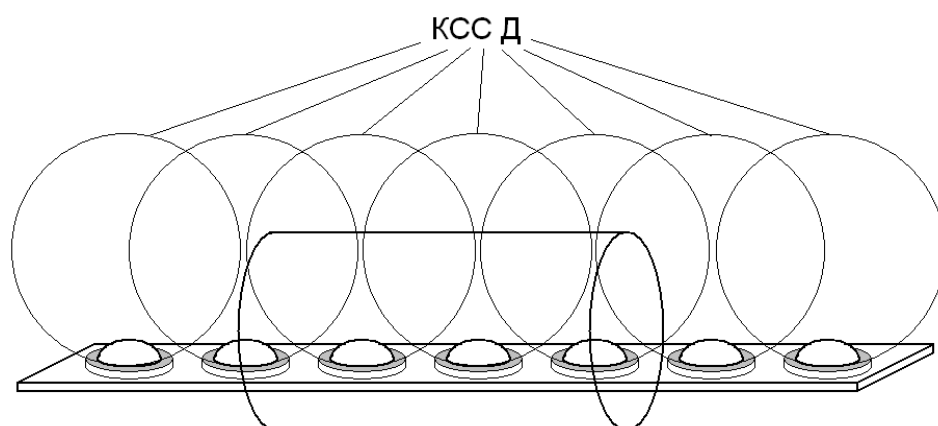
**Типы кривых силы света**

Обозначение	Наименование	Зона направлений максимальной силы света
К	Концентрированная	0...15°
Г	Глубокая	0...30°; 180...150°
Д	Косинусная	0...35°; 180...145°
Л	Полуширокая	35...55°; 145...125°
Ш	Широкая	55...85°; 125...95°
М	Равномерная	0...180°
С	Синусная	70...90°; 110...90°



**Рис. 9.** Распределение светового потока от различных видов светодиодов: а – КСС К; б – КСС Г; в – КСС Л; г – КСС Д

В случае использования отдельных светодиодов в конструкции фотокаталитического воздухоочистителя предпочтительнее КСС типа М или Д, которая, во-первых, не создает малого светового пятна, в котором процесс фотокатализа ускорился бы, а вокруг пятна – замедлялся, а во-вторых, относительно малый диаметр трубчатого воздухоочистителя позволит избежать возникновения "мёртвых зон" даже при достаточном удалении отдельных светодиодов друг от друга (рис. 10). Тем не менее, одной из следующих задач научных исследований является определение рационального соотношения диаметра воздуховода и расстояния между соседними светодиодами на ленте.



**Рис. 10.** Взаимное перекрытие КСС типа Д отдельных светодиодов в фотокаталитическом воздухоочистителе

### Литература

1. **Зайнишев А.В., Полунин Г.А.** Перспективный способ очистки воздуха производственных помещений и кабин мобильных агрегатов от оксида углерода // Матер. L междунар. науч.-техн. конф. "Достижения науки – агропромышленному производству". Челябинск: ЧГАА, 2011. Ч. VI. С. 84-89.
2. **Пармон В.Н.** Фотокатализ: Вопросы терминологии // Фотокаталитическое преобразование солнечной энергии. Новосибирск: Наука, 1991. С. 7-17.
3. **Артемьев Ю.М., Рябчук В.К.** Введение в гетерогенный фотокатализ. С.-Пб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 1999. 304 с.
4. **Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air** / Ed.by D.F. Ollis, H. Al-Ekabi. Elsevier, 1993.
5. **Особенности** конструирования мощных белых светодиодов / Абрамов В.С., Никифоров С.Г., Сушков В.П., Шишов А.В. // Светодиоды и лазеры, 2003, № 1. С. 2-19.
6. **ГОСТ 17677-82** (1989). Светильники. Общие технические условия.

Статья опубликована 27 декабря 2012 г.