

**ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО
И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

УДК 535.241.46:371.388

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ
ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА**

© 2026 г. Д. С. Дайбаге*, А. В. Осадченко, И. А. Захарчук **

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

**E-mail: daibagya@mail.ru*

***E-mail: zakharchukwork@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.05.2026

После доработки 27.08.2026

Принята к публикации 14.09.2026

Представлена конструкция установки, позволяющая провести эксперименты по исследованию освещенности от точечного источника света. Приведены основные физические и математические законы, с помощью которых необходимо получить требуемый результат. Представлены отдельные узлы и принцип взаимодействия с установкой. Дано описание изготовления компонентов установки. Для электронных частей установки приведены характеристики и оценка точности получаемых результатов. Сравнение получаемых экспериментальных данных с теоретическими подтверждает правильность техники проведения эксперимента.

Ключевые слова: лабораторное оборудование, фотометрия, освещенность, сила света, аддитивные технологии

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является разработка и создание доступной и легко воспроизводимой лабораторной установки для экспериментального исследования законов распределения освещенности от точечного источника света. Традиционные методы изучения фотометрических закономерностей в учебных лабораториях, как правило, реализуются на базе открытых оптических скамей. Главным недостатком таких систем является высокая чувствительность к внешней засветке, что диктует необходимость проведения измерений в полностью затемненных аудиториях. Специфика исследования зависимости освещенности от расстояния налагает ряд

требований. Во-первых, необходимо обеспечить уровень фонового излучения, пренебрежимо малый по сравнению с полезным сигналом. Во-вторых, требуется точное позиционирование приемника излучения (люксметра) относительно оптической оси источника. В-третьих, оборудование для массового учебного практикума должно быть ударопрочным и ремонтпригодным. Представленная в статье установка удовлетворяет перечисленным требованиям за счет использования светонепроницаемого корпуса, снижающего фоновую освещенность до значений менее 0.5% от максимального регистрируемого сигнала. Применение аддитивных технологий (3D-печати) в комбинации со стандартным конструкционным алюминиевым профилем позволяет получить дешевую легко тиражируемую ремонтпригодную систему, обеспечивающую контролируемую геометрию для проведения фотометрических измерений. Цель самой лабораторной работы заключается в исследовании зависимости освещенности от точечного источника света (ТИС) и определении его силы света с помощью двух различных геометрических конфигураций эксперимента.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Лабораторная установка выполнена в виде светонепроницаемого короба с устанавливаемыми на него люксметром и источником света, а также светонепроницаемой крышки. При изготовлении основных деталей был заложен принцип простой воспроизводимости и ремонтпригодности установки, сочетающийся с лаконичностью конструкции. Изделие состоит из четырех основных блоков, части установки внутри каждого из блоков соединяются при помощи покупных крепежных элементов. Первый блок под названием “Корпус” предназначен для монтажа всех элементов конструкции и для изолирования люксметра от сторонних источников света. Особенности конструкции светозащитного корпуса позволяют снизить фоновую освещенность внутри установки до значений порядка 0–3 лк, что составляет около 0–0.5% от максимального зарегистрированного значения освещенности. Конструктивная схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

Рис. 1. Конструктивная схема лабораторной установки...

Блок “Корпус” предусматривает быстрый демонтаж передней стенки с целью изменения положения люксметра для проведения эксперимента в иной геометрии, а также для оценки студентом фоновой освещенности в аудитории. Блок “Корпус” включает в себя опоры 1–3, боковую стенку с отверстием 4, боковую стенку 5, переднюю стенку 6, заднюю стенку 7,

крепление мерной шкалы 8. Боковая стенка с отверстием 4 имеет резьбовое соединение с блоком осветителя для его установки. Задняя и передняя стенки разделены на несколько частей для возможности их изготовления на любительском 3D-принтере струйной печати. Соединение частей передней стенки осуществляется при помощи пластин 9, 10. Перемещение люксметра осуществляется по направляющей, в качестве которой выступает алюминиевый профиль 2020. Для точного позиционирования люксметра на передней плоскости установлена измерительная шкала с шагом 1 мм. Все элементы передней стенки держатся на корпусе при помощи неодимовых магнитов диаметром 10 мм и толщиной 2 мм. Данное решение сделано с целью упрощенного демонтажа передней стенки.

Блок “Крышка” включает в себя следующие изготавливаемые изделия: продольную 11 и поперечная 12 балки, наклонную 13, центральную 14 и боковую 15 панели, заглушку 16. Центральная панель 14 имеет резьбовое соединение с блоком осветителя для его установки.

Блок “Осветитель” состоит из цилиндра 17, вмещающего в себя все электронные компоненты, и крышки цилиндра 18 с разъемом под питание. Непосредственным источником света является светодиод BL-L101UBW (Ningbo Betlux Electronics, Китай) с максимумом излучения в области 470 нм, диаметром 10 мм и направленной диаграммой излучения с углом обзора $\theta_{1/2} = 25^\circ$ (угол половинной яркости). Заявленная сила света составляет 1 кд. Питание светодиода осуществляется при помощи блока питания с напряжением 6 В, выдающего ток до 1 А. Конструкция блока предусматривает быструю замену любой электронной компоненты.

Блок “Люксметр” состоит из подставки люксметра 19, продольного крепежа люксметра 20, фиксатора 21, ручки люксметра 22 и указателя 23. Также использованы следующие покупные изделия: каретка роликовая 6565 под V-слот, люксметр UNI-T UT383S 13-1138 (Uni-Trend Technology, Китай) и крепеж. Установка люксметра предусмотрена в двух разных позициях с целью проведения нескольких экспериментов.

3. ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Разработанная лабораторная установка предоставляет возможность проведения двух независимых экспериментов (А и Б), направленных на исследование пространственного распределения освещенности и определение силы света ТИС (рис. 2).

Рис. 2. Схема проведения экспериментов А и Б...

В эксперименте А регистрация освещенности осуществляется при радиальном перемещении 1 датчика люксметра строго вдоль главной оптической оси светодиода 2. С точки зрения диаграммы направленности в эксперименте А светодиод можно рассматривать как ТИС с постоянной силой света. Поскольку в процессе движения приемника угол между главной оптической осью светодиода и прямой линией, соединяющей центр источника света с центром датчика люксметра, остается неизменным и равным нулю, влияние собственной анизотропии излучения 3 светодиода полностью нивелируется. Вследствие этого освещенность $E(x)$ описывается классическим законом обратных квадратов:

$$E(x) = \frac{I_0}{(x + x_0)^2} + E_{\Phi}$$

где I_0 [кд] – сила света ТИС, E_{Φ} [лк] – фоновая освещенность, x [м] – расстояние от светодиода до приемника, а $x_0 = 50$ мм – минимальное расстояние между ТИС и центром датчика люксметра при $x = 0$, обусловленное конструкцией установки и характерное только для эксперимента А.

Эксперимент Б предполагает перемещение люксметра вдоль направления 4, перпендикулярного главной оптической оси 5 светодиода, излучающего вертикально вниз 6. Такая конфигурация влечет за собой непрерывное изменение угла падения света. В этих условиях стандартное приближение изотропного источника дает существенную погрешность вследствие ярко выраженного направленного характера свечения реального светодиода. Для корректного математического описания получаемой зависимости в расчетах необходимо учесть обобщенный закон Ламберта [1]:

$$E(x) = \frac{I_0 h^{m+1}}{(x^2 + h^2)^{\frac{m+3}{2}}} + E_{\Phi}$$

где $h=170.6$ мм – фиксированное расстояние от светодиода до приемника, а m – эмпирический показатель направленности излучения. Данный параметр характеризует степень сужения светового пучка и позволяет адекватно учесть нелинейное падение силы света при отклонении от центральной оптической оси, обеспечивая высокую точность аппроксимации. Теоретическая оценка параметра m может быть выполнена на основе паспортных характеристик использованного светодиода. Исходя из определения, при отклонении на угол $\theta_{1/2} = 25^\circ$ сила света падает в два раза, что позволяет выразить искомый параметр из обобщенного закона Ламберта следующим образом [1]:

$$m = \frac{\ln(0.5)}{\ln(\cos \theta_{1/2})} \approx 7.07.$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Для проверки работоспособности созданной установки и оценки достоверности получаемых данных были проведены серии тестовых измерений для экспериментов А и Б. Полученные зависимости освещенности $E(x)$ ТИС от расстояния представлены на рис. 3. Стоит отметить, что анализ полученных массивов данных может осуществляться непосредственно в разработанном программном обеспечении. Данное приложение позволяет удобно импортировать результаты измерений и проводить их автоматизированную обработку и аппроксимацию [2].

Рис. 3. Зависимость освещенности ТИС от расстояния для экспериментов А (а) и Б (б).

Результаты эксперимента А продемонстрированы на рис. 3а в виде зависимости освещенности $E(x)$ от обратного квадрата расстояния (x^{-2}). Как следует из представленных данных, экспериментальные точки с высокой степенью точности аппроксимируются линейной функцией. Это полностью подтверждает справедливость применения классического закона обратных квадратов. Согласно теоретической модели, тангенс угла наклона полученной прямой численно равен силе света I_0 источника. По результатам аппроксимации экспериментальных данных значение сила света составило $I_0 = 1.056 \pm 0.02$ кд, что демонстрирует хорошее согласие с заявленными паспортными характеристиками используемого светодиода (1 кд).

Результаты эксперимента Б представлены на рис. 3б. На графике наблюдается симметричная колоколообразная зависимость освещенности от координаты x , что наглядно демонстрирует направленный характер излучения реального светодиода. Рассчитанное значение силы света составило $I_0 = 1.00 \pm 0.02$ кд, что также хорошо согласуется с паспортными характеристиками светодиода и подтверждает как адекватность выбранной теоретической модели, так и высокую надежность разработанной измерительной установки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная лабораторная установка позволяет исследовать зависимость освещенности от расстояния до источника света в контролируемых условиях при минимальном влиянии внешней засветки (рис. 4). Конструкция установки обеспечивает наглядность эксперимента, воспроизводимость измерений и удобство работы со светодиодным источником и подвижным

люксметром. Важным преимуществом установки является ее завершенное конструктивное исполнение: аккуратный внешний вид, понятная компоновка элементов и соответствие базовым принципам промышленного дизайна. Это повышает интерес студентов к выполнению лабораторной работы и делает установку более привлекательной по сравнению с устаревшими учебными стендами. Кроме того, установка отличается прочностью, ремонтопригодностью и возможностью повторного изготовления с использованием доступных компонентов, что особенно важно для учебного оборудования, рассчитанного на регулярную эксплуатацию.

Рис. 4. Фотография лабораторной установки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ding J., I C.L., Wang J., Yang H.* Inventions. 2024. V. 10. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.3390/inventions10010001>
2. *Дайбаге Д.С., Дайбаге Д.М.* Программа виртуальной лаборатории по измерению освещенности точечного источника света “PhotoLab”. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025696747 РФ, 2025.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Конструктивная схема лабораторной установки. Для демонстрации скрытых частей установки при создании проекционного вида были отключены некоторые компоненты

Рис. 2. Схема проведения экспериментов А и Б

Рис. 3. Зависимость освещенности ТИС от расстояния для экспериментов А (а) и Б (б). Кружками изображены экспериментальные данные, а штриховой кривой – аппроксимация

Рис. 4. Фотография лабораторной установки

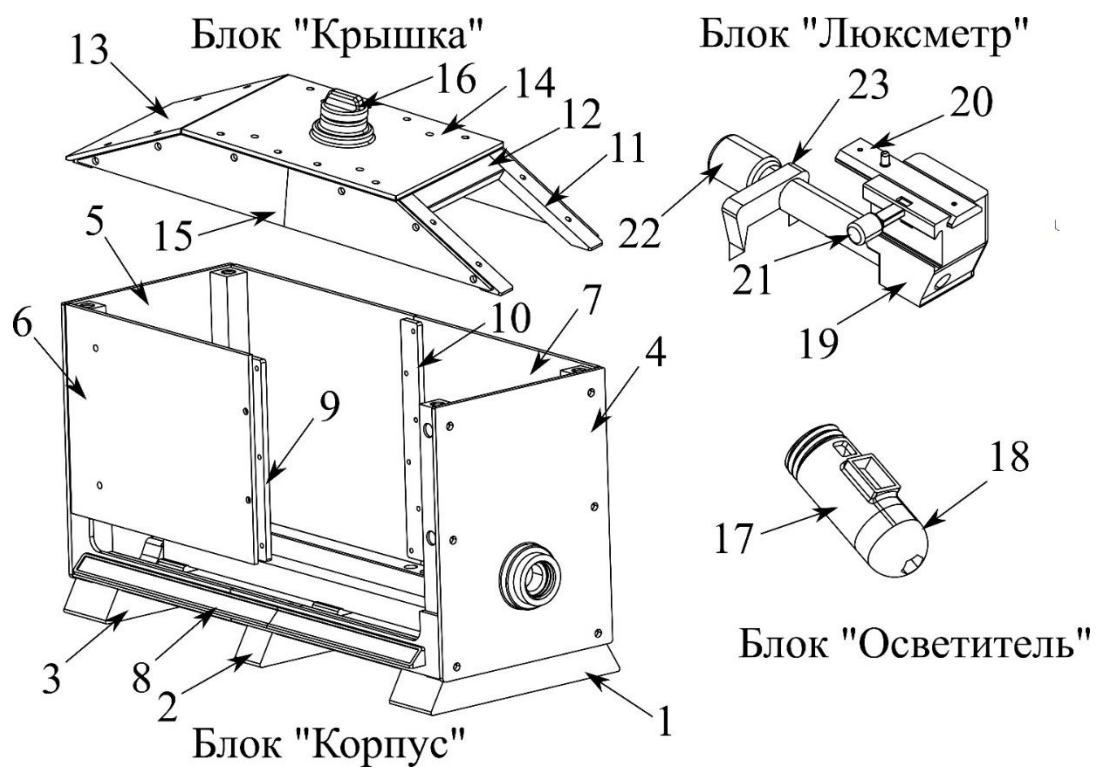


Рис. 1.

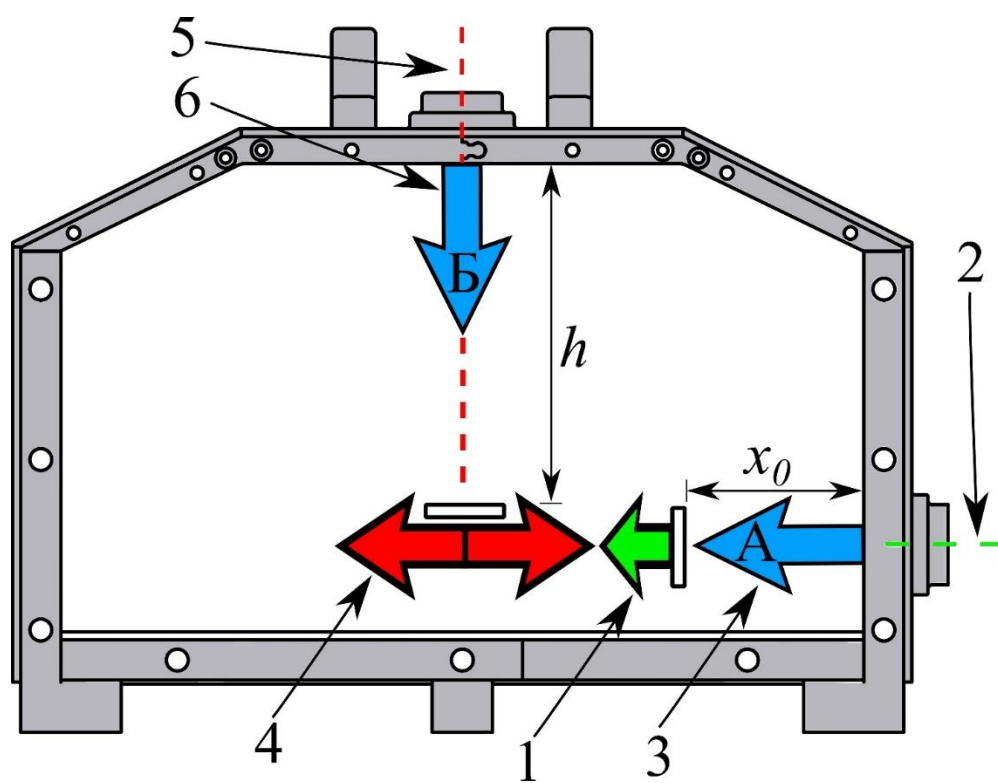


Рис. 2.

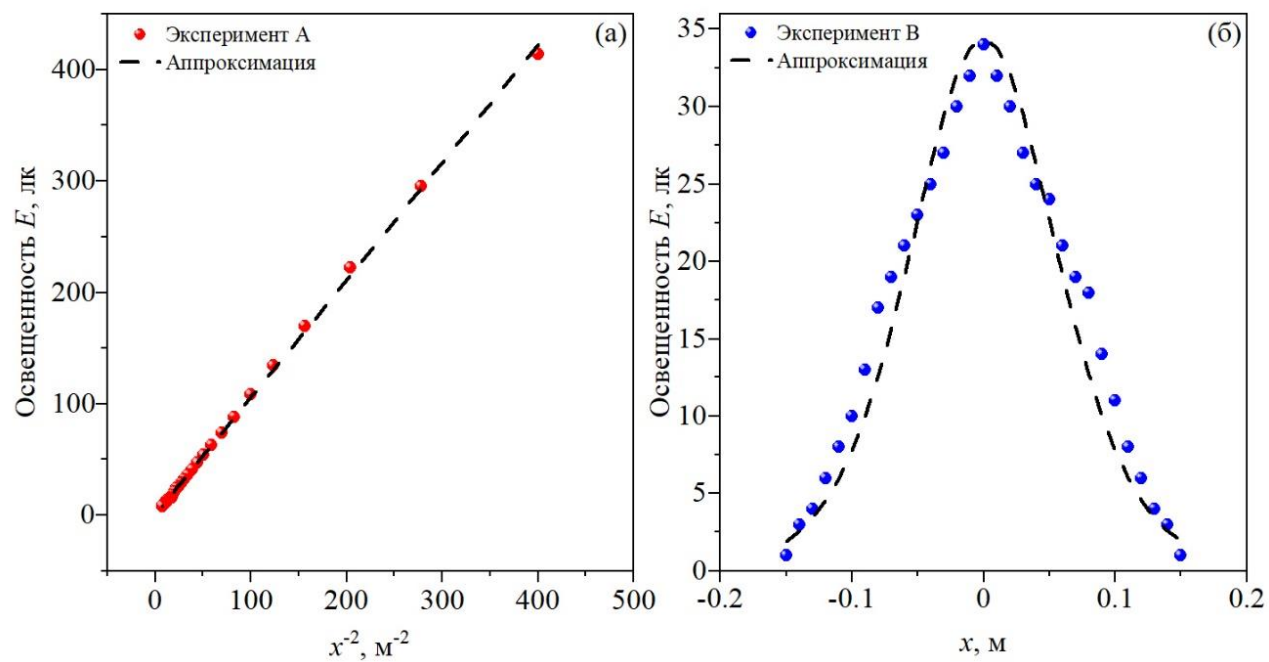


Рис. 3.

