

УДК 535.8[373.5016+378.016]

UDC 535.8[373.5016+378.016]

## К ИЗУЧЕНИЮ ЗАКОНА ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА В ШКОЛЬНОМ И ВУЗОВСКОМ КУРСАХ ФИЗИКИ

## TO STUDYING THE LAW OF REFRACTION OF LIGHT IN SECONDARY AND HIGH SCHOOL COURSES OF PHYSICS

**Н. А. Ахраменко,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры физики  
и химии БелГУТа;

**А. П. Павленко,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры физики  
и химии БелГУТа

**N. Akhramenko,**  
PhD in Technical Sciences, Associate  
Professor of the Department of Physics  
and Chemistry, BelSUT;

**A. Pavlenko,**  
PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department  
of Physics and Chemistry, BelSUT

Поступила в редакцию 5.04.18.

Received on 5.04.18.

В учебно-методической литературе имеются различия в отображении хода лучей при предельном угле полного внутреннего отражения. Опыт показывает, что сложными темами курса физики являются «Закон преломления света» и «Полное внутреннее отражение». Это актуально как для школьников в рамках геометрической оптики, так и для студентов в рамках волновой оптики. В связи с этим рассмотрены некоторые аспекты, касающиеся интенсивности и хода преломленного луча в условиях предельного угла полного внутреннего отражения. Предлагается уточнить содержание учебного материала по рассматриваемым темам в части, касающейся хода лучей при предельном угле.

*Ключевые слова:* закон преломления, луч падающий, луч преломленный, полное внутреннее отражение, предельный угол.

In the educational-methodical literature there are differences in the reflection of the ray path at the limiting angle of total internal reflection. Experience shows that the complex topics of the course of physics are "The Law of Refraction of Light" and "Full Internal Reflection". This is true both for schoolchildren in the framework of geometric optics, and for students in the framework of wave optics. In this connection, some aspects concerning the intensity and the course of the refracted ray under conditions of the maximum angle of total internal reflection are considered. It is proposed to clarify the content of the educational material on the topics under consideration in terms of the path of the rays at the limiting angle.

*Keywords:* law of refraction, ray incident, ray refracted, total internal reflection, limiting angle.

**Введение.** Закон преломления света (по-другому Снеллиуса или Снелла) хорошо известен и гласит [1–7]: луч падающий, луч преломленный и нормаль к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для этих двух сред, равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол падения,  $\beta$  – угол преломления,  $n_{21}$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой. (При этом отметим, что обозначения углов падения, преломления и отражения в учебнике

по физике за 8 класс [1, с. 152]:  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  соответственно, а в учебнике за 11 класс [2, с. 106] эти же углы:  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\beta$ , что вносит некоторую путаницу.)

Обычно после формулировки закона преломления в учебно-методической литературе обсуждается ход преломленного луча при переходе из оптически менее плотной среды в более плотную и наоборот. Из выражения (1) следует, что при переходе луча из оптически более плотной среды в менее плотную при некотором угле падения (называемым критическом или предельном углом) возникает ситуация, когда угол преломления становится равным  $90^\circ$ . При  $\beta = 90^\circ$  в [3, с. 468] читаем: «При некотором угле  $\alpha = \alpha_{\text{пр}}$  преломленный луч 2 будет скользить вдоль границы раздела ( $\beta = 90^\circ$ )». На поясняющем рисунке

(рисунок 16.25 в [3, с. 468]) изображено, что луч 2 скользит вдоль границы раздела сред. При том же угле  $\alpha = \alpha_{\text{пр}}$  в школьном учебнике по физике за 11 класс написано [2, с. 106]: «По мере увеличения угла падения, при некотором его значении  $\alpha_0$ , угол преломления станет  $\gamma = 90^\circ$  (в наших обозначениях  $\beta = 90^\circ$ ), то есть свет не будет попадать во вторую среду. Энергия преломленной волны при этом станет равной нулю, а энергия отраженного излучения будет равна энергии падающего». Далее на поясняющем рисунке (рисунок 73 в [2, с. 106]) изображено, что луч все же скользит вдоль границы раздела сред. В [4, с. 243] читаем: «пределный угол полного внутреннего отражения  $\alpha_{\text{пр}}$  – это такой угол падения, при котором преломленный луч скользит вдоль границы раздела сред и угол преломления прямой». Как видим, нет единой точки зрения относительно преломленного луча при предельном угле падения. В связи с этим рассмотрим разные аспекты, касающиеся этого вопроса.

**Основная часть. Формулы Френеля.** Закон преломления не описывает соотношение интенсивностей и поляризаций падающего, преломленного и отраженного лучей. Формулы Френеля определяют амплитуды, фазы и поляризации отраженной и преломленной световых волн при прохождении света через границу раздела двух прозрачных диэлектриков [5–8].

Амплитуду вектора напряженности электрического поля падающей волны  $\mathbf{A}$  можно разложить на составляющую с амплитудой  $A_p$ , параллельной плоскости падения (Р-поляризация), и составляющую с амплитудой  $A_s$ , перпендикулярной плоскости падения (S-поляризация). Амплитуду отраженной волны  $\mathbf{R}$  можно разложить на составляющую с амплитудой  $R_p$ , параллельной плоскости падения, и составляющую с амплитудой  $R_s$ , перпендикулярной плоскости падения. Аналогично для преломленной волны амплитуда  $\mathbf{D}$  разложится на составляющие  $D_p$  и  $D_s$ .

Формулы Френеля для этих амплитуд имеют вид:

$$R_s = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} A_s, \quad R_p = \frac{\text{tg}(\alpha - \beta)}{\text{tg}(\alpha + \beta)} A_p \quad (2)$$

$$D_s = \frac{2 \sin i \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} A_s, \quad D_p = \frac{2 \sin i \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta) \cos(\alpha + \beta)} A_p \quad (3)$$

В экспериментах, как правило, измеряют не амплитуду световой волны (определяемые выражениями (2) и (3)), а ее интенсив-

ность, то есть переносимый волной поток энергии, пропорциональный квадрату амплитуды. Отношение среднего за период потока энергии в отраженной волне к среднему потоку в падающей волне называют коэффициентом отражения  $r$ . Тогда, используя выражения (2) и (3), получим:

$$r_s = \frac{|R_s|^2}{|A_s|^2} = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}, \quad (4)$$

$$r_p = \frac{|R_p|^2}{|A_p|^2} = \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)}. \quad (5)$$

При  $\beta = 90^\circ$  из соотношений (4) и (5) получим, что  $r_s = 1$  и  $r_p = 1$ , то есть падающая поляризованная (как в плоскости падения, так и перпендикулярно ей) волна полностью отразится от границы раздела. Отношение среднего за период потока энергии в преломленной волне к среднему потоку в падающей волне называют коэффициентом прохождения  $d$ . Тогда без учета потерь на поглощение  $d_s = 1 - r_s$  и  $d_p = 1 - r_p$ . Если  $r_s = 1$  и  $r_p = 1$ , то  $d_s = 0$  и  $d_p = 0$ . Следовательно, энергия преломленной поляризованной (как в плоскости падения, так и перпендикулярно ей) волны равна нулю.

Естественный свет, падающий на границу раздела, можно рассматривать как сумму взаимно перпендикулярных волн  $A_p$  и  $A_s$ . Тогда для суммарной интенсивности отраженного света [6, с. 63]

$$I_{\text{отр}} = \frac{1}{2} I_{\text{пад}} \left[ \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)} + \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \right]. \quad (6)$$

При  $\beta = 90^\circ$  из соотношения (6) получим, что  $I_{\text{отр}} = I_{\text{пад}}$ , то есть падающий на границу раздела естественный свет полностью отразится. Следовательно, с учетом закона сохранения энергии можно прийти к выводу, что интенсивность преломленной волны равна нулю. Таким образом, из формул Френеля следует, что интенсивность преломленной волны равна нулю при предельном угле падения.

При угле падения, стремящемся к предельному, коэффициенты отражения  $r_s$  и  $r_p$ , очень быстро возрастают. Интенсивность отраженного естественного света также быстро возрастает. Поэтому, используя явление полного внутреннего отражения и измеряя предельный угол, можно определять показатель преломления какого-либо вещества, что широко используют на практике.

**Полное внутреннее отражение.** Полное внутреннее отражение (ПВО) возникает при падении луча из оптически более плотной среды на границу раздела двух прозрачных сред под углом, равным или большим предельного. При этом падающий поток излучения испытывает полное отражение от границы раздела сред и целиком возвращается в исходную оптически более плотную среду. В этих условиях коэффициент отражения становится равным единице. В оптически менее плотной среде, в области вблизи границы раздела, существует электромагнитное поле, однако поток энергии через границу отсутствует. Это объясняется тем, что энергия проходит через границу дважды, то есть входит в оптически менее плотную среду и затем выходит обратно. Энергия во второй среде появляется в процессе установления колебаний. Пока фронт волны не достиг границы раздела, во второй среде нет поля. Как только волна дойдет до границы раздела, она сначала будет почти целиком проникать во вторую среду и лишь частично отражаться. По мере установления колебаний коэффициент отражения будет быстро нарастать и стремиться к своему предельному значению – единице. Полное отражение имеет место лишь для установившегося режима [5–7; 9].

Теория полного внутреннего отражения основывается на использовании формул Френеля [5–7]. При этом приходится полагать, что синус угла преломления превышает единицу, а косинус угла преломления рассматривается как комплексная величина. В этом случае геометрический смысл тригонометрических функций теряется (как проекции вектора на направление). Однако это приводит к правильным конечным результатам. В работе [10] требуемые результаты получены без нарушения геометрического смысла проведенных вычислений и показано, что баланс плотностей потоков электромагнитной энергии, перпендикулярных границе раздела, выполняется для каждого момента времени.

Процесс распространения излучения при ПВО в случае ограниченных пучков сопровождается продольным и поперечным смещением падающего пучка. Величина продольного смещения по порядку величины близка к длине волны. Вследствие дифракции, обусловленной конечными размерами падающего пучка, наряду с продольным смещением пучка наблюдается латеральная (побоч-

ная) волна, распространяющаяся вдоль поверхности раздела, быстро затухая. В опыте с гелиево-кадмиевым лазером для границы раздела вода – воздух латеральная волна регистрировалась на расстоянии нескольких сантиметров. Для расстояния 3 см и  $\lambda = 441,6$  нм интенсивность волны составляла всего  $1,6 \cdot 10^{-8}$  от мощности падающего пучка света [9]. Свойства латеральной волны используют в спектроскопических методах контроля поверхностей на основе нарушенного полного внутреннего отражения.

**Нарушенное полное внутреннее отражение.** Нарушенное полное внутреннее отражение (НПВО) основано на проникновении световой волны из оптически более плотной среды в менее плотную среду на глубину порядка длины световой волны в условиях полного внутреннего отражения и заключается в том, что коэффициент отражения становится равным меньше единицы вследствие поглощения света в слое, который проникает волна. Величина ослабления отраженной волны зависит от поляризации падающей волны и показателя поглощения второй среды. НПВО используется для исследования поверхностных оптических свойств материалов и пленок. При этом методе, в частности, малые показатели поглощения измеряются при углах, приблизительно равных критическому, и используется возникающая при этом поверхностная оптическая волна, распространяющаяся вдоль поверхности исследуемого тела на некоторое расстояние [11].

Явление нарушенного полного внутреннего отражения следует учитывать при передаче световых сигналов на большие расстояния с помощью световодов.

**Проникновение света во вторую среду.** В учебно-методической литературе довольно часто встречается утверждение, что при полном внутреннем отражении падающий луч не проникает во вторую среду. Например, в [3, с. 468] говорится: «при  $\alpha > \alpha_{\text{пр}}$  свет не пройдет во вторую прозрачную среду».

«Утверждение, что поток электромагнитной энергии не попадает во вторую среду, полностью отражаясь от границы раздела, нельзя считать точным» [6, с. 69]. Как отмечалось выше (Полное внутреннее отражение), в оптически менее плотной среде, в области вблизи границы раздела, существует электромагнитное поле. Часть потока энергии при стационарном процессе попадает во вторую среду, а затем из нее выходит.

Опыт, демонстрирующий проникновение света в оптически менее плотную среду при полном отражении, был выполнен еще Ньютоном. Он прижимал к гипотенузной грани прямоугольной призмы другую призму, сошлифованную сферически (рисунок 1).

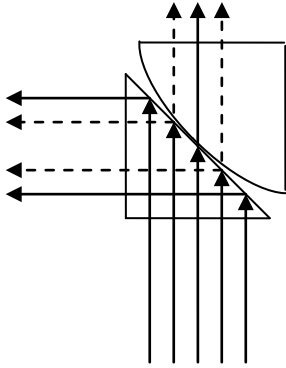


Рисунок 1 – Свет в зоне контакта проходит далее. Свет возле зоны контакта частично проходит далее. Свет вдали от зоны контакта полностью отражается

Свет проходил во вторую призму не только в месте соприкосновения, но и в небольшом кольце вокруг него – там, где толщина воздушного зазора сравнима с длиной волны. При использовании белого света внешний край кольца имел красноватую окраску. Это говорит о том, что для красных лучей глубина проникновения во вторую среду больше, так как у них больше длина волны [5, с. 413–414].

**Использование принципа обратимости световых лучей.** С точки зрения геометрической оптики, не вдаваясь в тонкости, связанные с волновой природой света, обосновать отсутствие преломленного луча, на наш взгляд, можно следующим образом. Допустим, что луч, падая под предельным углом, начал скользить по границе раздела сред. Используем принцип обратимости световых лучей. Согласно этому принципу луч, двигаясь в обратном направлении по границе раздела сред, в каком-то месте должен отклониться от границы раздела в направлении исходного падающего луча. Однако все точки границы раздела сред равноправны, нет какой-либо особой или выделенной точки, поэтому, двигаясь в обратном направлении по границе раздела, у луча нет оснований для отклонения. Поэтому, чтобы выполнялся принцип обратимости световых лучей, нужно принять интенсивность преломленного луча равной нулю, при угле падения, равном предельному. То есть преломленный луч отсутствует и, соответственно, нет скольжения по границе раздела сред.

**Выводы.** Рассматривая волновую природу света и особенности его взаимодействия с границей раздела сред при угле падения, равном и больше предельного, можно отметить следующее. В явлениях полного внутреннего отражения и нарушенного полного внутреннего отражения упоминается, что существует некоторая ограниченная область на границе раздела сред вблизи точки

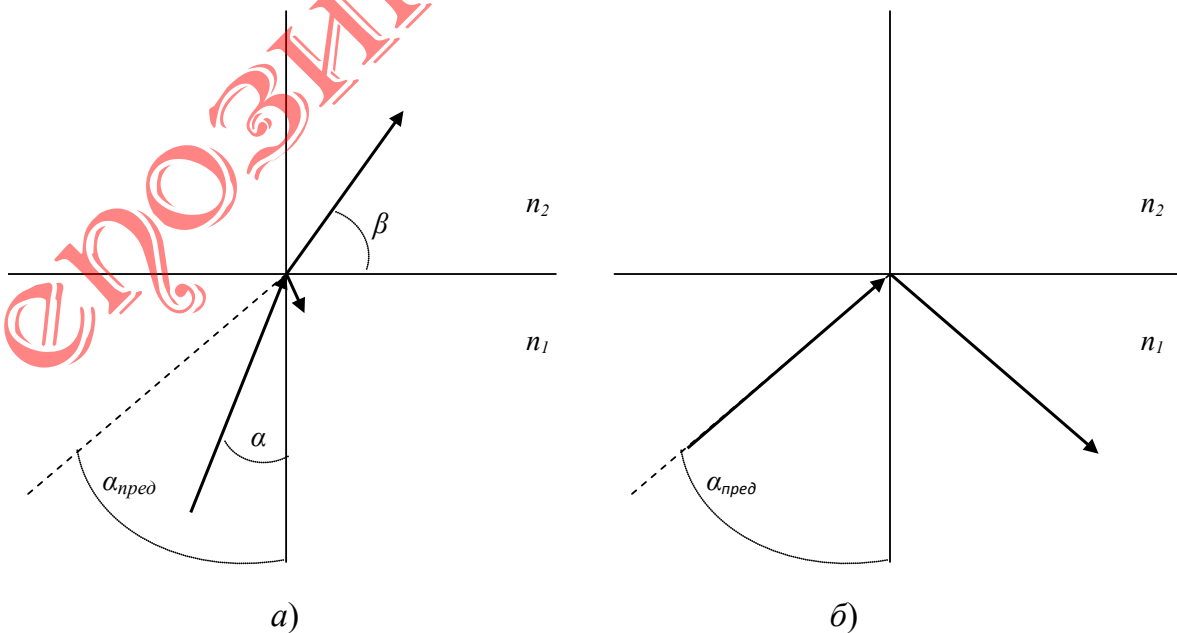


Рисунок 2 – При падении под углом, меньшим предельного, луч преломляется и отражается (а); при падении под углом, равным предельному, луч полностью отражается (б)



падения, где волна, быстро затухая, распространяется вдоль поверхности раздела. Однако отождествить ее с лучом, скользющим по границе раздела сред, вряд ли можно. Использование формул Френеля дает основание говорить о том, что интенсивность преломленной волны равна нулю при предельном угле падения. Использование принципа обратимости световых лучей в рамках геометрической оптики позволяет обосновать отсутствие преломленного луча при угле падения, равном предельному, или прийти к выводу, что интенсивность преломленного луча равна нулю и, соответственно, нет

скольжения по границе раздела сред. В связи с этим в учебно-методической литературе при угле падения, равном предельному, преломленный луч не следует изображать на поясняющем рисунке (рисунок 2).

В учебно-методической литературе содержание закона преломления целесообразно дополнить следующим замечанием: «При переходе луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную по мере приближения угла преломления к  $90^\circ$  интенсивность преломленного луча стремится к нулю».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченкова, Л. А. Физика: учеб. для 8-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Ю. Д. Лещинский ; под ред. Л. А. Исаченковой. – 2-е изд., пересмотр. – Минск : Народная асвета, 2015. – 183 с.
2. Жилко, В. В. Физика: учеб. пособие для 11-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / В. В. Жилко, Л. Г. Маркович. – 2-е изд., пересмотр. и доп. – Минск : Народная асвета, 2014. – 287 с.
3. Аксенович, Л. А. Физика в средней школе: Теория. Задания. Тесты: учеб. пособие для учреждений, обеспечивающих получение общ. сред. образования / Л. А. Аксенович, Н. Н. Ракина, К. С. Фарино ; под ред. К. С. Фарино – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2004. – 720 с.
4. Касаткина, И. Л. Физика: пособие-репетитор: магнетизм, колебания и волны, оптика, элементы теории относительности, физика атома: теория. Задания с ответами. Подготовка к ОГЭ и ЕГЭ / И. Л. Касаткина. – Ростов н/Д : Феникс, 2016. – 492 с.
5. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Т. IV Оптика / Д. В. Сивухин. – М., 1980. – 752 с.
6. Калитеевский, Н. И. Волновая оптика / Н. И. Калитеевский. – М. : Высшая школа, 1978. – 383 с.
7. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – 6-е изд. – М. : Физматлит, 2003. – 848 с.
8. Капорский, Л. Н. Френеля формулы / Л. Н. Капорский // Физическая энциклопедия: в 5 т. – Т. 5. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. – С. 375.
9. Золоторев, В. М. Полное внутреннее отражение / В. М. Золоторев // Физическая энциклопедия : в 5 т. Т. 4. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1994. – С. 27.
10. Макаров, А. М. Явление полного внутреннего отражения / А. М. Макаров, Л. А. Лулева, К. А. Макаров // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2013. – № 3. – С. 17–38.
11. Золоторев, В. М. Нарушенное полное внутреннее отражение / В. М. Золоторев // Физическая энциклопедия : в 5 т. – Т. 3. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1992. – С. 246–247.

#### REFERENCES

1. Isachenkova, L. A. Fizika: ucheb. dya 8-go kl. uchrezhdeniy obshch. sred. obrazovaniya s rus. yaz. obucheniya / L. A. Isachenkova, Yu. D. Leshchinskiy; pod red. L. A. Isachenkovoy. – 2-ye izd., peresmotr. – Minsk : Narodnaya asveta, 2015. – 183 s.
2. Zhilko, V. V. Fizika: ucheb. posobiye dlya 11-go kl. uchrezhdeniy obshch. sred. obrazovaniya s rus. yaz. obucheniya / V. V. Zhilko, L. G. Markovich. – 2-ye izd., peresmotr. i dop. – Minsk : Narodnaya asveta, 2014. – 287 s.
3. Aksenovich, L. A. Fizika v sredney shkole: Teoriya. Zadaniya. Testy: ucheb. posobiye dlya uchrezhdeniy, obespechivayushchikh polucheniye obshch. sred. obrazovaniya / L. A. Aksenovich, N. N. Rakina, K. S. Farino; pod red. K. S. Farino. – Minsk : Adukatsyya i vykhavanne, 2004. – 720 s.
4. Kasatkina, I. L. Fizika: posobiye-repetitor: magnetizm, kolebaniya i volny, optika, element teorii otноситelnosti, fizika atoma: teoriya. Zadaniya s otvetami. Podgotovka k OGE i YeGE / I. L. Kasatkina. – Rostov n/D : Feniks, 2016. – 492 s.
5. Sivukhin, D. V. Obshchiy kurs fiziki. T. IV. Optika / D. V. Sivukhin. – M., 1980. – 752 s.
6. Kaliteyevskiy, N. I. Volnovaya optika / N. I. Kaliteyevskiy. – M. : Vysshaya shkola, 1978. – 383 s.
7. Landsberg, G. S. Optika / G. S. Landsberg. – 6-ye izd. – M. : Fizmatlit, 2003. – 848 s.
8. Kaporskiy, L. N. Frenelya formuly / L. N. Kaporskiy // Fizicheskaya entsiklopediya: v 5 t. – T. 5. – M. : Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya, 1998. – S. 375.
9. Zolotorev, V. M. Polnoye vnutrenneye otrazheniye / V. M. Zolotorev // Fizicheskaya entsiklopediya : v 5 t. T. 4. – M. : Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya, 1994. – S. 27.
10. Makarov, A. M. Yavleniye polnogo vnutrennegho otrazheniya / A. M. Makarov, L. A. Luneva, K. A. Makarov // Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. „Yestestvennyye nauki“. – 2013. – № 3. – S. 17–38.
11. Zolotorev, V. M. Narushennoye polnoye vnutrenneye otrazheniye / V. M. Zolotorev // Fizicheskaya entsiklopediya : v 5 t. T. 3. – M. : Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya, 1992. – S. 246–247.