

Ю.И. Терентьев

Особенности рассеяния света в области края тонкого непрозрачного экрана. Ч. 1

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 28.08.2000 г.

Экспериментально установлено, что световые лучи, отклоненные в области края тонкого непрозрачного экрана на экран или от него, оказавшись в области края второго экрана, удаленного от первого на расстояния, меньше 4,5 мм, по-прежнему отклоняются только на экран или от него. Световые лучи, отклоненные в области края первого экрана на экран или от него, после пути, равного 25 мм, отклоняются в области края 2-го экрана как на экран, так и от экрана. Часть световых лучей распространяется через области краев экранов без изменения направления.

В настоящей статье изложены результаты экспериментального исследования характера распространения света вблизи экранов, осуществленные на основе следующих ранее установленных экспериментальных фактов и закономерностей:

1. Над поверхностью непрозрачных тел, а также по обе стороны границы раздела оптически однородных сред существуют зоны отклонения световых лучей шириной во много раз больше длины волны видимого света, отклоняющие лучи в противоположные стороны относительно первоначального направления [1]. Эффективность отклонения света в зоне тонкого экрана на экран или от него падает с удалением лучей от экрана [2].

2. Краевой свет от экрана состоит из отклоненных в зоне отклонения на экран и от него лучей, образующих основную компоненту, и лучей, отраженных от его края, отчасти также после их предварительного отклонения в зоне, образующих компоненту, названную зоммерфельдовской вследствие их распространения (после отражения) непосредственно от экрана [1].

3. Фазы краевых компонент, отклоняемых от экрана и в область тени, испытывают начальный сдвиг на $0,5\pi$ соответственно по направлению распространения и против него относительно фазы падающей волны [3 – 5], а не на π и 0, как это утверждается Рабиновичем [6]. В результате между ними возникает сдвиг, равный π [3]. Испытав сдвиг фазы на $-0,5\pi$ при отклонении на экран и на π в процессе отражения, зоммерфельдовская компонента, распространяющаяся на освещенной стороне, оказывается в фазе с основной. Зоммерфельдовская компонента, распространяющаяся в область тени, после потери полуволны при отражении оказывается, наоборот, в противофазе с основной компонентой того же направления.

4. При нанесении на экран слоя сажи происходит значительное перераспределение энергии в краевой волне с освещенной стороны в область тени без изменения суммарной величины краевого потока, обусловленное тем, что вследствие частичного поглощения сажей зоммерфельдовской компоненты уменьшаются ослабление основной компоненты в области тени и усиление ее на освещенной стороне [1].

5. Амплитуда краевого света от тонкого слабопоглощающего экрана с прямолинейным краем обратно

пропорциональна тангенсу угла дифракции при его значениях $\geq 0,04 \div 0,07^\circ$. Вследствие этого основная часть краевого потока распространяется в пределах $0 \div 1^\circ$ [3, 7].

Схемы экспериментов приведены на рис. 1,а, 2,а, где S' – изображение щели S шириной 36 мкм, показанное в виде кривой приблизительного распределения интенсивности по его ширине и построенное с помощью объектива «Юпитер-8»; \mathcal{E} – тонкий экран (лезвие), установленный в плоскости S' и перекрывающий половину потока от объектива; P – проволока из нихрома диаметром 90 мкм, параллельная краю \mathcal{E} , расположенная на расстоянии $x = 4,5$ мм от плоскости S' и на расстоянии $L = 96$ мм от плоскости сканирования дифракционной картины щелью шириной 0,1 мм по оси H ; г.т – границы геометрической тени проволоки. Щель S освещается параллельным пучком зеленого света ($\lambda = 0,53$ мкм), сформированного из излучения лампы накаливания.

На рис. 1,а проволока находится в краевом потоке, распространяющемся на стороне, противоположной тени от \mathcal{E} , из области его края, состоящем почти полностью из лучей, отклоненных в направлении от экрана, так как экран покрыт сажей, ослабляющей отражение лучей, отклоненных в сторону экрана и падающих на его край.

Чтобы исключить наложение на данный краевой свет падающего света, правый край расположенной перед объективом апертурной щели u_0 шириной 1,5 мм устанавливался на ось светового пучка. При этом ее левый край ограничивал пучок по \min_1 от щели S . (В случае устранения наложения падающего света на краевой свет, отклоненный в тень \mathcal{E} , на ось пучка выводился левый край u_0). Проволочка удалена от оси падающего пучка на $r = 255$ мкм. Благодаря этому через ее зоны отклонения распространяются краевые лучи, отклоняемые в узком слое зоны экрана шириной порядка 1 мкм, позволяющем считать его точечным источником, расположенным у края экрана, при определении границ геометрической тени проволоки. Что следует из формулы $h_3 = (259,5 - 0,786\epsilon)/\epsilon$ [2], где h_3 – расстояние до экрана в мкм, с которого отклоняется луч; ϵ – угол отклонения луча в мин ($\epsilon = 3438r/x$). Кроме того, при таком r проходящие вблизи проволоки краевые лучи из зоны отклонения правого края u_0 имеют малую интенсивность в сравнении с интенсивностью краевого света из зоны отклонения \mathcal{E} .

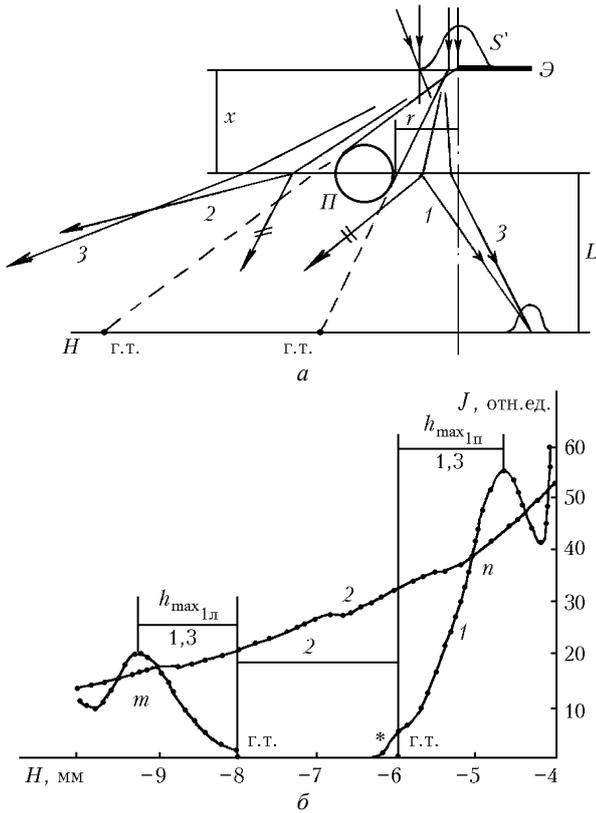


Рис. 1. Схема исследования дифракции краевого света, распространяющегося из области края тонкого непрозрачного экрана в направлении, противоположном его тени, на проволочке (а). Распределение интенсивности света в краевой волне, распространяющейся из области края экрана на стороне, противоположной его тени, и в образуемой ею дифракционной картине от проволочки (б)

В данном эксперименте распределение интенсивности J в плоскости сканирования в дифракционной картине от проволочки и краевой волне от Э характеризуется кривыми 1, 2 (рис. 1, б), где H отсчитывается от оси S' .

Согласно кривой 1 свет практически не проникает в область геометрической тени проволочки. Следовательно, отклоненные в зоне Э в направлении от него лучи 1, 2, оказавшись в зонах отклонения у правого и левого краев проволочки, после пути x по-прежнему отклоняются только в направлении от экрана (проволочки). Небольшая освещенность (обозначена звездочкой) в тени проволочки у ее правой границы тени, по-видимому, создается малоинтенсивными краевыми лучами от правого края u_0 и лучами, отразившимися от края экрана (после отклонения и падения на него) вследствие неполного поглощения их сажей.

Лучи 1, 2 интерферируют с проходящими на большем удалении от проволочки и, следовательно, менее отклоненными ею лучами 3, образуя max и min за пределами границы тени проволочки. Эти полосы сдвинуты на $0,4 \div 0,55$ мм относительно их положений, рассчитанных по [3, формула (3)]. Меньшее значение J в дифракционной картине на участках между границей тени и точками m, n в сравнении с J краевой волны обусловлено вблизи границы тени отклонением краевых лучей из зон отклонения проволочки, а на большем удалении – начальной и геометрической разностью хода между лучами 1, 2 и 3.

На рис. 2, а проволочка установлена в тени экрана на $r = 197$ мкм от оси S' . При этом распределение интенсивности света в плоскости сканирования, в дифракционной картине от проволочки и краевом потоке, состоящем из лучей, отклоненных на экран в его зоне отклонения, характеризуется кривыми 1, 2 рис. 2, б (J на $H < 4,4$ мм уменьшена вдвое).

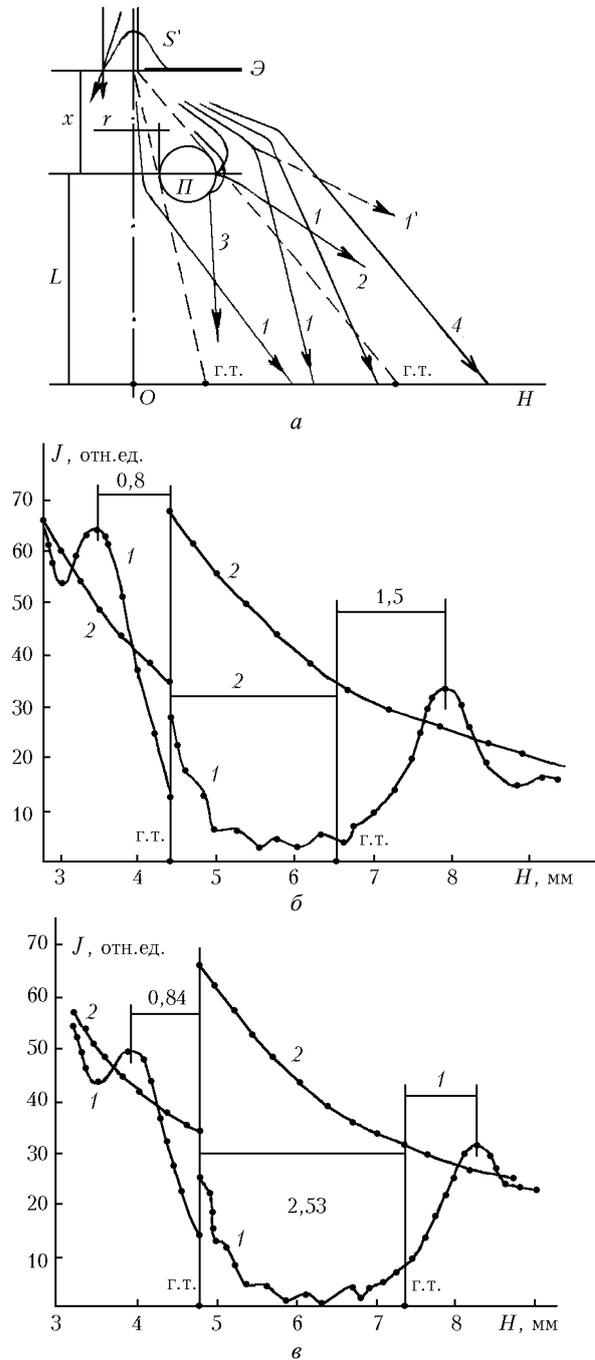


Рис. 2. Схема исследования дифракции краевого света, распространяющегося из области края тонкого непрозрачного экрана в его тень, на проволочке (а). Распределение интенсивности света в краевой волне, распространяющейся в тень экрана, и в образуемой ею дифракционной картине от проволочки (б) и от проволочки, покрытой сажей (в)

Как показывает кривая 1 (рис. 2), в данном эксперименте, в отличие от первого, область тени от проволоочки оказывается заполненной светом. Следовательно, отклоненные на экран лучи, оказавшись в зонах отклонения у левого и правого краев проволоочки, после пути x по-прежнему отклоняются на экран (проволочку), распространяясь в область ее тени непосредственно (лучи 1) и после отражения (лучи 3). Вследствие интерференции этих лучей, идущих из зон противоположных краев проволоочки, образуются теньевые дифракционные полосы.

Существование дифракционных полос вне тени проволоочки не свидетельствует об отклонении части краевых лучей (I') в направлении от проволоочки, так как с покрытием проволоочки сажей, поглощающей частично падающие на нее лучи, различие между интенсивностями полос и краевой волны согласно рис. 2, в существенно уменьшилось. (В соответствующем эксперименте диаметр прежней проволоочки с сажей был равен 112 мкм, а $r = 214$ мкм).

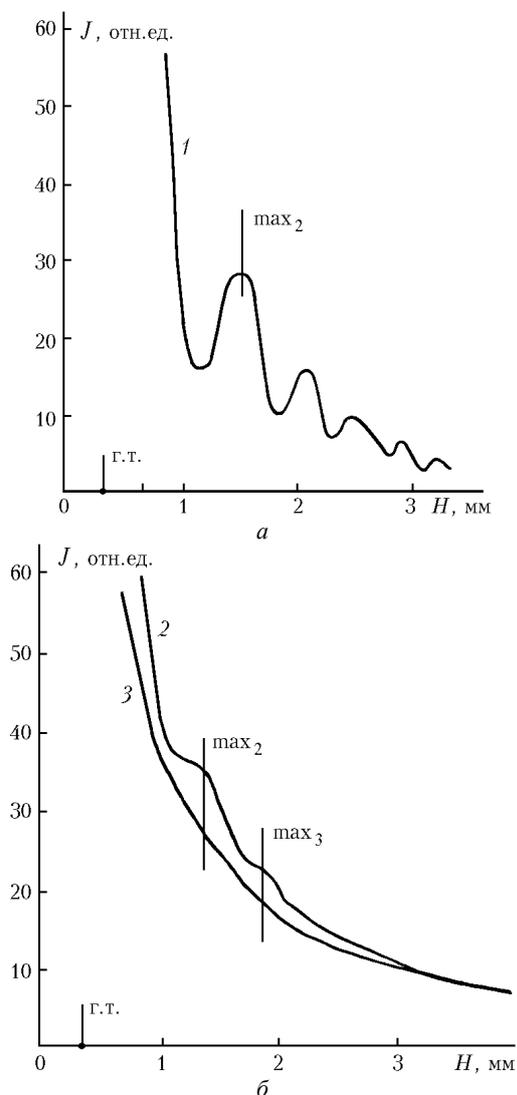


Рис. 3. Распределение интенсивности света в дифракционных картинах от (чистого и покрытого сажей) второго экрана при распространении около него краевого света, отклоняемого в тень первого экрана в области его края

В эксперименте с экраном-лезвием, введенным в тень первого экрана вместо проволоочки на $r = 14$ мкм ($x = 4,5$ мм), вследствие более сильного влияния сажи дифракционные полосы оказались на грани исчезновения, как это видно из рис. 3, где кривая 1 характеризует распределение J в дифракционной картине при непокрытом сажей втором экране, кривая 2 – когда на него нанесена сажа, кривая 3 – распределение J в краевой волне.

Значительное ослабление J дифракционных полос после нанесения на проволочку и второй экран сажи показывает, что причиной их образования является интерференция отклоненных на проволочку и отраженных от нее лучей 2 с краевыми лучами 4, отклоняющимися в слабой части зоны отклонения проволоочки.

В случае отклонения лучей в зонах отклонения проволоочки не только от нее, но и на проволочку область тени проволоочки в предыдущем эксперименте также была бы заполнена светом и также наблюдались бы дифракционные полосы. Однако согласно вышеизложенному света в ней нет.

Как видно из рассмотренного, световые лучи, отклоненные в зоне отклонения экрана в каком-либо направлении, отклоняются в зоне следующего экрана после указанного пути x в прежнем направлении.

Данный факт дополнительно подтверждается экспериментами с щелью вместо проволоочки, а также с двумя последовательно и противоположно установленными экранами (без зазора между проекциями экранов, либо с небольшим перекрытием их).

В эксперименте по первой схеме покрытие сажей экрана имеет принципиальное значение. Когда экран без сажи, тогда отклоненные и упавшие на него лучи не будут поглощены и после отражения в направлении проволоочки отклонятся в ее сторону, в ее зоне отклонения. В результате область тени проволоочки окажется заполненной светом. Как следствие, эксперимент теряет смысл.

В эксперименте же по второй схеме с чистым экраном и экраном, покрытым сажей, краевой поток в области его тени состоит только из лучей, отклоненных на экран, распространяющихся в нее непосредственно, а также после предварительного отражения от края экрана. Нанесение сажи лишь усиливает теньевой поток.

Следует отметить, что степень влияния сажи колеблется при повторных нанесениях ее на чистый экран, что видно из рис. 4, кривые на котором характеризуют отношение интенсивностей в плоскости сканирования (удаленной на 100,6 мм от Э), на расстояниях H от оси S' , в теньевой краевой волне J_{2c}/J_2 и в краевой волне, распространяющейся на стороне противоположной тени экрана J_1/J_{1c} (J_{2c}, J_{1c} – интенсивности краевого света при экране, покрытом сажей; J_2, J_1 – когда экран без сажи). Кривые 1 характеризуют влияние сажи в рассмотренных экспериментах; 2 – при повторном нанесении ее.

Согласно им в обоих случаях сажа незначительно изменила интенсивность краевых лучей, распространяющихся в направлении от экрана на малых углах дифракции ($H/L; r/x$).

Благодаря относительно большому значению r в первом эксперименте сажа существенно ослабила отражаемые от экрана в направлении проволоочки лучи (рис. 4, б; кривая 1; $H = 6 \div 8$ мм), обеспечив тем самым его успех.

В данных экспериментах экран покрывался сажей посредством кратковременных внесений его во внешнюю

часть пламени горячей вакуумной резины (полиэтилена, полистирола).

Возможно, степень влияния сажи на J краевого света зависит от наличия в ней несгораемых остатков вещества, размера ее частиц, ориентации и плотности их упаковки.

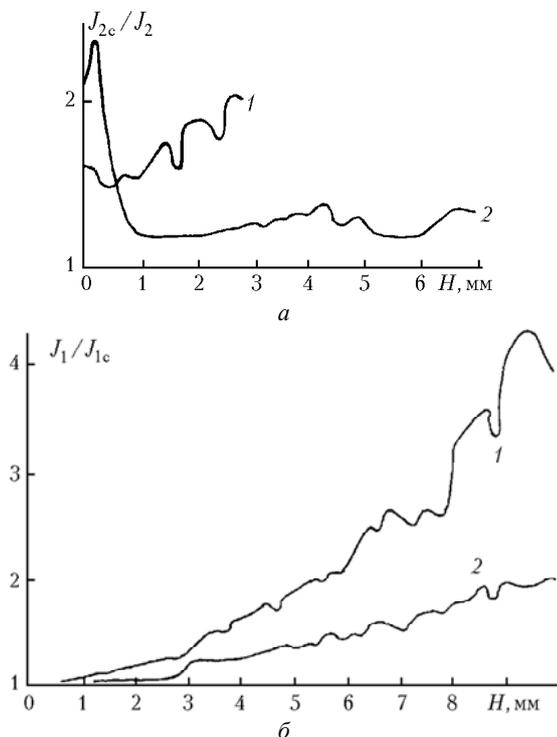


Рис. 4. Характер влияния покрывающей экран сажи на интенсивность выходящего из области его края краевого света

В статье [5] на основе экспериментальных данных установлено, что выходящие из зоны отклонения тонкого экрана с прямолинейным краем в область его тени и в противоположную сторону потоки краевого света равны по отдельности $1/7$ части светового потока $\Phi_{п.з.}$ падающего на зону. Даже при допущении отсутствия разности хода между ними до расщепления (в составе падающего света) их сумма равна $0,57$ величины $\Phi_{п.з.}$, т.е. часть падающих лучей распространяется через зону без отклонения.

В статье [3] описан эксперимент по доказательству сдвига фаз на π у частей краевого света, распространяющихся в тень дифрагирующего экрана и на противоположной стороне. В нем световой пучок в плоскости изображения S' щели S шириной 30 мкм был перекрыт медной проволокой диаметром 200 мкм, параллельной S' . Выше

проволочки, на расстоянии $x = 25$ мм от нее, был установлен экран-лезвие. Его край располагался на оси пучка параллельно проволочке. У левой стороны проволочки распространялись крайевые лучи из зоны отклонения экрана, отклоненные в его тень, а с правой стороны проходили лучи, отклоненные в направлении от тени экрана. В результате отклонения этих лучей в зонах отклонения проволочки в область ее тени в ней образовались дифракционные полосы.

Если бы лучи, отклоненные в направлении от экрана, продолжали отклоняться только в направлении от проволочки после указанного пути, то вместо полос в тени проволочки наблюдалась бы постепенно уменьшающаяся от левой границы тени к правой освещенность, обусловленная отклонением на проволочку лучей, отклоненных в сторону экрана. Но полосы есть, причем с одинаковой интенсивностью по обе стороны центрального \min (в одинаковых порядках), указывающей на равные потоки световых лучей, отклоняемых в тень проволочки слева и справа от нее. Следовательно, световые лучи каждого из краевых потоков, распространяющихся в тени экрана и на противоположной стороне, отклонявшиеся в прежнем направлении в зоне следующего экрана после пути $x < 4,5$ мм, пройдя путь, заключенный в интервале между $4,5$ и 25 мм, отклоняются уже не только в прежнем, но и в противоположном направлениях.

Установленный в рассмотренных экспериментах характер отклонения световых лучей в областях у краев последовательно расположенных экранов, а также неизвестные до появления вышеупомянутых работ и подтвержденные результатами данной работы факты значительного влияния поглощающей способности экранов на дифракцию света должны проявляться также в особенностях формирования дифракционной составляющей света, рассеянного крупными частицами атмосферного аэрозоля (каплями воды в облаках, дожде; кристалликами льда; частицами пыли) при достаточно большой концентрации частиц или при наличии в них сильнопоглощающих примесей.

1. Терентьев Ю.И. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 4. С. 510–520.
2. Терентьев Ю.И. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 12. С. 1269–1273.
3. Терентьев Ю.И. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 11. С. 1141–1146.
4. Терентьев Ю.И. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 3. С. 314–323.
5. Терентьев Ю.И. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 411–413.
6. Rubinowicz A. Thomas Young and Theory of Diffraction // Nature. 1957. V. 180. P. 160–162.
7. Терентьев Ю.И. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 11. С. 1147–1153.

Yu.I. Terent'ev. Peculiarities of light scattering in the region of the edge of a thin nontransparent shield.

It is found experimentally that the light rays, reflected by the edge of a thin nontransparent shield in the direction to the shield or from it, when entering the region of the edge of the second shield spaced 4.5 mm apart, are again reflected only in one of two directions (to the shield or from it). In the case, when the second shield is located at the distance of 25 mm from the first one, the rays in the range of its edge are reflected in both directions – to the shield and from it. Some portion of rays passes the range of the shield's edges with no change of their direction.