

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА РАССЕИВАЮЩИМИ СЛОЯМИ
С ФРЕНЕЛЕВСКИМИ ГРАНИЦАМИ*Н. А. Войшвилло*

Исследовано влияние френелевских границ плоского рассеивающего слоя на распределение световых потоков отраженного, пропущенного и поглощенного, в среде при разных оптических толщинах слоя.

Вопрос о влиянии поверхностей, ограничивающих рассеивающий слой, на поле рассеянного излучения является одной из наиболее сложных и весьма далеких от решения проблем оптики рассеивающих сред [1-4]. Результаты как теоретических, так и немногочисленных экспериментальных работ говорят о том, что границы, отбрасывая подходящее к ним из слоя излучение обратно в рассеивающую среду, оказывают самое существенное воздействие как на величину пропущенных и отраженных потоков, так и на их пространственное распределение. Закономерности, согласно которым граничные поверхности реагируют на падающее излучение, весьма разнообразны. Одной из разновидностей границ являются френелевские границы, которые отражают упавший на них световой поток согласно формулам Френеля. В том случае, когда рассеивающий слой расположен в среде менее плотной, чем он сам, существует важное отличие воздействия френелевских границ от действия границ, отражающих по другим законам: коэффициент отражения для излучения, падающего на френелевскую границу из толщ слоя, растет по мере увеличения угла падения (отсчитываемого от нормали к слою) и начиная с некоторого угла он становится равным единице, что объясняется явлением полного внутреннего отражения. Именно такой границей обладают многие естественные рассеивающие объекты и прежде всего различного рода водоемы.

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального изучения воздействия границ, отражающих по закону Френеля, на одну из важнейших характеристик рассеянного излучения — коэффициента отражения. Исследование проведено с одной из разновидностей рассеивающих сред — светорассеивающими стеклами, которые отличаются от оптических прозрачных стекол четко выраженной микронеоднородной структурой. Светорассеивающие стекла представляют собой благодатный материал с точки зрения экспериментального изучения воздействия границ, так как с ними сравнительно легко осуществляются методики, позволяющие варьировать характер границ слоя и его коэффициент отражения, что с другими рассеивающими объектами сделать затруднительно, если не невозможно.

1. Используемый методический прием заключается в том, что к одной или к обеим поверхностям исследуемого светорассеивающего стекла притирается со слоем иммерсии плоская поверхность другого стеклянного объекта: либо полусферы из прозрачного оптического стекла, либо непрозрачной плоскопараллельной пластинки, поглощающей вошедшее в нее излучение. Иммерсия и притираемая деталь с точностью до второго

знака после запятой имеют одинаковые со светорассеивающим стеклом показатели преломления, благодаря чему световые лучи не преломляются на его границе и таким образом преломляющее действие границы искусственно устраняется. Рассеяние оптического стекла полусферы пренебрежимо мало по сравнению с рассеянием исследуемых образцов. Разные

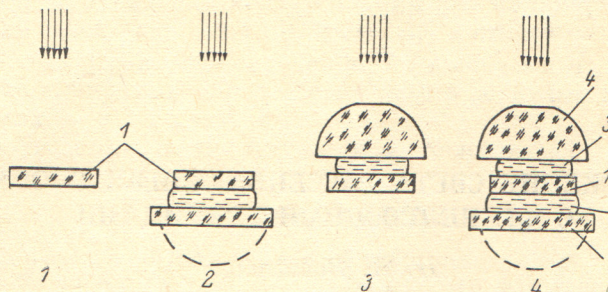


Рис. 1. Схема измерений коэффициента отражения плоских образцов при изменении состояния их граничных поверхностей.

1 — образец, 2 — подложка из поглощающего стекла, 3 — прослойка иммерсии, 4 — полусфера из прозрачного оптического стекла.

варианты расположения образцов и вспомогательных деталей схематически изображены на рис. 1. 1-я схема соответствует условию измерений коэффициента отражения образца с обеими действующими границами. Измерения, согласно схеме 2, позволяют исключить действие выходной границы. В 3-й исключается преломляющее действие входной плоской границы, которая таким образом

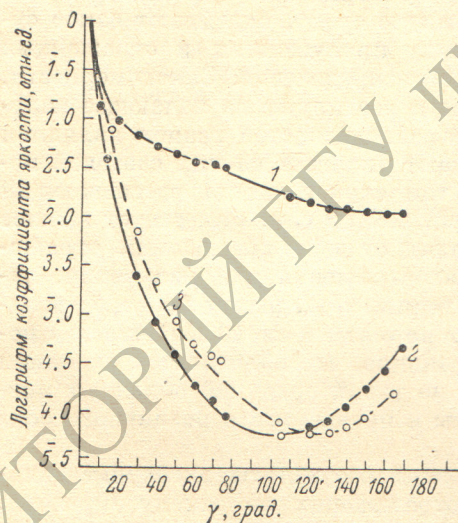


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния элементарных объемов светорассеивающих стекол.

1 — стекло марки MC12, 2 — MC19, 3 — MC23.

сфера, или поглощающая пластинка. Коэффициент отражения, измеренный по схеме 1, будем обозначать через r (обе границы действуют), а по схеме 4 — через R (действие обеих границ устранено). При измерениях коэффициента отражения весь составной объект, состоящий из образца с притертыми вспомогательными деталями, вставляется в измерительное отверстие светометра с автоматического спектрофотометра СФ2. Более подробно методика обработки результатов измерений, выполненных

Таблица 1

Параметры однократного рассеяния при $\lambda = 550$ нм

Марка стекла	Параметры	
	показатель рассеяния σ , см^{-1}	$1 - \Delta$
MC19	23.0	$5 \cdot 10^{-4}$
MC23	290	$1 \cdot 10^{-4}$
MC12	370	$1.8 \cdot 10^{-4}$
7/23	43	$3 \cdot 10^{-4}$
ОНС1	4200	$5 \cdot 10^{-5}$
ОНС2	3500	$5 \cdot 10^{-4}$

как бы искусственно устраняется. У образцов, измеряемых по 4-й схеме, исключается действие обеих границ, при этом на выходной¹ грани может быть установлена или полусфера, или поглощающая пластинка. Коэффициент отражения, измеренный по схеме 1, будем обозначать через r (обе границы действуют), а по схеме 4 — через R (действие обеих границ устранено). При измерениях коэффициента отражения весь составной объект, состоящий из образца с притертыми вспомогательными деталями, вставляется в измерительное отверстие светометра с автоматического спектрофотометра СФ2. Более подробно методика обработки результатов измерений, выполненных

¹ Для удобства здесь и далее будем называть ту пограничную плоскость, через которую освещающий пучок входит в рассеивающий объект, входной, а противоположную — выходной или дном.

при помощи спектрофотометра для рассматриваемого случая, описана в работе [5]. Там же дана теоретическая оценка влияния полусферы 4 на коэффициент отражения R . Согласно представленным на рис. 1 схемам, были выполнены измерения коэффициентов отражения образцов из че-

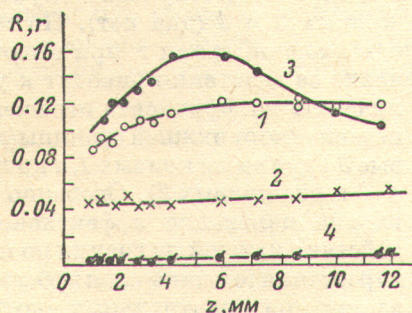


Рис. 3. Коэффициенты отражения образцов различной толщины из стекла марки MC19.

$\lambda=550$ нм. 1 — обе границы действуют; 2 — входная граница действует, действие выходной границы искусственно устранено; 3 — действие входной границы искусственно устранено, выходная граница действует; 4 — действие и входной и выходной границ искусственно устранено.

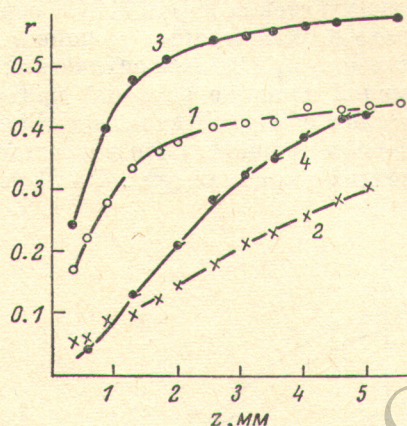


Рис. 4. Коэффициенты отражения образцов различной толщины из стекла марки MC23.

$\lambda=550$ нм. Обозначения кривых те же, что и на рис. 3.

тырех сортов светорассеивающих стекол марок MC19, MC12, MC23 и 7/23 (натровоборосиликатное стекло), которые различаются между собой параметрами однократного рассеяния света. Индикатрисы рассеяния эле-

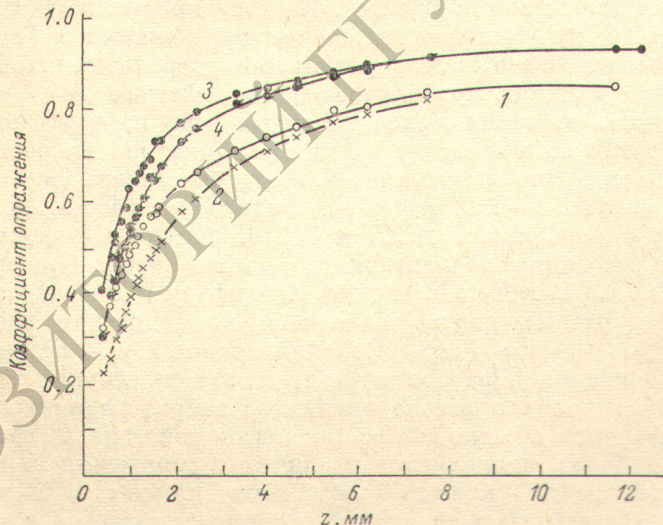


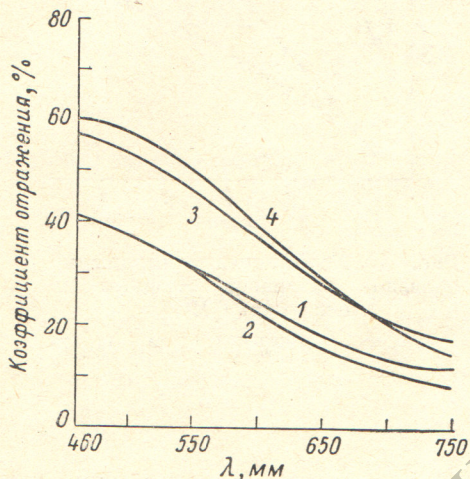
Рис. 5. Коэффициенты отражения образцов различной толщины из натровоборосиликатного стекла марки 7/23.

$\lambda=550$ нм. Обозначения кривых согласно рис. 3.

ментарных объемов для трех сортов представлены на рис. 2. Вероятность выживания фотона Δ и показатели рассеяния при длине волны $\lambda=550$ нм указаны в табл. 1. Показатели преломления перечисленных сортов стекол равны соответственно 1.47, 1.49, 1.52 и 1.48.

2. На рис. 3—6 представлены результаты измерения коэффициентов отражения при $\lambda=550$ нм и всех четырех схем установки образцов разной

толщины и разных сортов стекла (цифры кривых на рис. 3—6 обозначают номер схемы). Рисунки демонстрируют чрезвычайно сильное влияние границ на коэффициент отражения: различия в величине отраженного потока для слоя с френелевскими границами и без границ может составить сотни процентов. Особенно велико это влияние для наименее рассеивающего стекла марки МС19, образцы которого обладают относительно невысокими оптическими толщинами (рис. 3). Воздействие дна наиболее существенно при малых оптических толщинах. На рис. 3, 4 и 5 (при самой малой толщине образца) кривые 1 и 3, соответствующие случаям, когда слои обладают дном, идут выше кривых 2 и 4 (дна нет). По мере увеличения толщины слоя возрастает роль входной грани и при высоких оптических толщинах (рис. 4 и 5) устранение ее действия приводит к увеличению коэффициента отражения



независимо от нижней границы (кривые 3 идут выше кривых 1, а кривые 4 — выше кривых 2). Особенно наглядно изменение эффективности действия каждой из границ по мере нарастания толщины слоя прослеживается при спектральных измерениях

Рис. 6. Спектральные кривые коэффициентов отражения двух образцов из натровоборосиликатного стекла толщиной 0,38 мм (кривые 1 и 2) и 0,99 мм (кривые 3 и 4).

Кривые 1 и 3 — обе границы действуют; 2 и 4 — действие обеих границ искусственно устранено.

ниях коэффициента отражения для натровоборосиликатного стекла, у которого показатель рассеяния, а потому и оптическая толщина резко падают с увеличением длины волны (рис. 6). По ходу кривых $r=f(\lambda)$ и $R=f(\lambda)$ можно видеть, как с уменьшением оптической толщины эффект увеличения коэффициента отражения в результате устранения входной грани уступает место влиянию «отбрасывающего» действия дна.

Эффективность действия выходной грани (дна) на коэффициент отражения слоя различна в средах с разными индикатрисами рассеяния элементарных объемов, что можно видеть, если сопоставить уже рассмотренные графики на рис. 3—5. В отличие от индикатрис рассеяния элементарных объемов стекол марок МС23 и МС19, сильно вытянутых вперед, индикатриса рассеяния элементарного объема натровоборосиликатного стекла марки 7/23 вытянута в заднюю полусферу [6]. Показатели рассеяния σ стекол разных сортов находятся в следующем соотношении: $\sigma_{МС23} > \sigma_{7/23} > \sigma_{МС19}$ ($\lambda=550$ нм). Сравним кривые 1 и 4 при одной геометрической толщине образцов всех трех сортов стекла, равной примерно 3 мм. В стеклах с сильно вытянутой вперед индикатрисой рассеяния элементарного объема «отбрасывающее» действие выходной грани сказывается сильнее, чем явление увеличения отражения за счет устранения входной грани — кривые 1 идут выше кривых 4. Обратная картина наблюдается у натровоборосиликатного стекла. Здесь несмотря даже на меньшую оптическую толщину (по сравнению с образцом из стекла марки МС23), влияние выходной грани сказывается значительно слабее, что физически хорошо объясняется вытянутостью индикатрисы рассеяния элементарного объема этого стекла в заднюю полусферу.

3. Описанные выше результаты показывают, что вследствие действия френелевских границ оказываются возможными такие ситуации, когда слой с меньшей оптической толщиной, обладающий границами, отражает больше, чем слой той же среды с большей оптической толщиной, но без границ. Соотношение между коэффициентами отражения R (слой без

границ) и r (слой с обеими френелевскими границами) демонстрируется рис. 7. (Прямая, проведенная под углом 45° к координатным осям, соответствует случаю, когда $R=r$). Из графика следует, что при высоких отражениях слоя $R > r$, а при малых — появление границ приводит к увеличению доли отражаемого потока — $r > R$. Следовательно, границы меняют соотношение между R и r по-разному в зависимости от оптической толщины слоя: когда слой много отражает (оптическая толщина значительна), границы уменьшают его отражение. При меньших толщинах соотношение обратное. Этот вывод еще более наглядно подтверждается графиками на рис. 8. Наблюдаемой картине можно дать приближенное

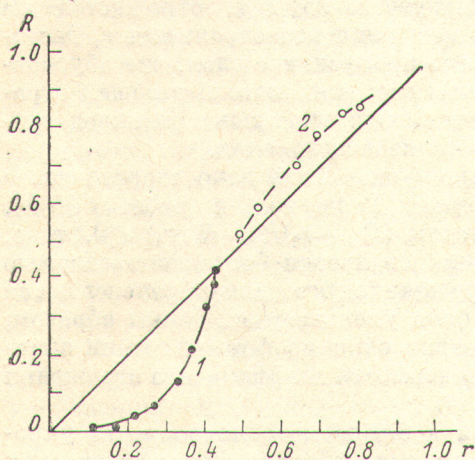


Рис. 7. Связь между коэффициентами отражения образцов с действующими границами стекло—воздух и при их искусственном устранении.

1 — образцы из стекла марки MC23, 2 — MC12.

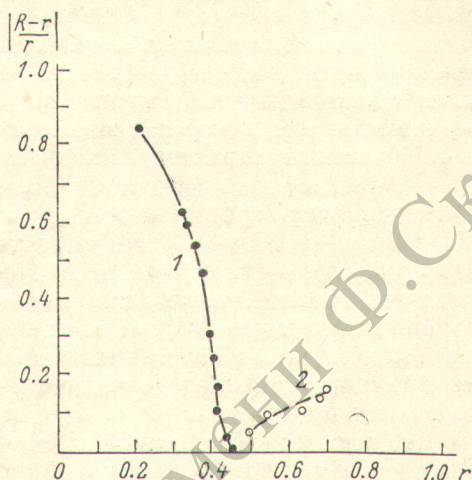


Рис. 8. Изменение относительной разницы между коэффициентом отражения слоя без границ R и коэффициентом отражения того же слоя с френелевскими границами.

1 — стекло марки MC23, 2 — MC12.

физическое толкование, рассматривая для простоты отдельно действие каждой из границ и начиная с выходной грани. Эффективность действия дна обусловлена коэффициентом пропускания слоя и угловым распределением потока, подошедшего к нему. Первым обстоятельством определяется та доля потока, которая испытывает действие дна, вторым — величина коэффициента отражения r_2 , с которым дно «отбрасывает» подошедший к нему световой поток обратно в слой. Отражение дном потока обратно в слой влечет за собой относительное превышение коэффициента отражения r по сравнению с коэффициентом отражения R . Очевидно, этот эффект выражен тем сильнее, чем больше пропускание слоя. В свою очередь появление входной грани приводит к относительному уменьшению коэффициента отражения r по сравнению с коэффициентом отражения R , так как входная грань также подобно дну «отбрасывает» обратно в слой тот световой поток, который подошел к ней и был бы отражен слоем в отсутствие входной грани (см. разд. 2). Понятно, что влияние входной грани проявляется тем острее, чем большая доля светового потока подходит к ней, т. е. чем больше коэффициент отражения слоя R . Одновременно с этим каждая граница «отбрасывает» поток обратно в слой тем сильнее, чем выше значение коэффициента отражения r_2 . По мере нарастания оптической толщины коэффициент пропускания слоя уменьшается, что означает ослабление влияния дна на полный отраженный поток, а действие входной грани усиливается вследствие возрастания отражения слоя, т. е. коэффициента отражения R . Таким образом, при изменении оптической толщины меняется эффективность влияния каждого из этих двух противоположно действующих факторов. Отсюда понятно, почему от-

носительная разность коэффициентов отражения R и r стремится к минимуму при некоторых определенных значениях r .

4. При изучении влияния френелевских границ на коэффициент отражения образцов из стекла марки МС19 было обнаружено следующее интересное явление: в некотором диапазоне оптических толщин кривая, описывающая зависимость коэффициентов отражения от толщины слоя, проходит через максимум. Это означает, что имеется такой участок оптических толщин, где при уменьшении толщины (начиная примерно от значения оптической толщины, равной 27) коэффициент отражения не уменьшается, а напротив, увеличивается (см. кривую 3 на рис. 3). Очевидно, этот эффект может проявиться тогда, когда значительная доля светового потока, подошедшего ко дну, отражается им обратно в толщу среды, т. е. значения коэффициента отражения r_2 достаточно велики, и когда достаточно велико пропускание слоя, что обуславливает заметную долю отраженного дном светового потока в общем отраженном потоке. Такое явление может наблюдаться лишь при определенном сочетании характеристик светорассеивающего слоя.

Наблюдаемому необычному явлению может быть дано теоретическое объяснение на основе теорий, развитых Гершуном в работах [7, 8]. Из формул работы [8] следует, что если $(R_\infty - r_2)/(1 - R_\infty r_2) < 0$, т. е. $R_\infty < r_2$ (R_∞ — коэффициент отражения оптически бесконечно толстого слоя без границ), то коэффициент отражения этого слоя с френелевскими границами при увеличении толщины слоя уменьшается. Таким образом, при определенных сочетаниях параметров слоя из формул теории вытекает именно такая «парадоксальная» зависимость коэффициента отражения слоя от его толщины.

Что касается физической сущности наблюдаемого явления, то упрощенно его можно трактовать как результат действия двух физических закономерностей: во-первых, падения коэффициента отражения самого слоя без границ по мере уменьшения его оптической толщины и, во-вторых, одновременным с этим возрастанием влияния дна, приводящего к увеличению коэффициента отражения слоя. Взаимодействием этих двух противоположно действующих факторов и можно объяснить существование максимума в кривой, описывающей зависимость коэффициента отражения слоя от его толщины. Максимум наступает тогда, когда эффект дна, приводящий к увеличению отражения, превалирует.

5. «Отбрасывание» границами рассеянного потока обратно в толщу среды приводит к увеличению длины оптического пути, который проходят лучи в среде до выхода из нее по сравнению с длиной оптического пути лучей в этом же слое без границ. Очевидно, что одним из следствий этого воздействия границ должно быть увеличение потерь световой энергии на поглощение. Представленные в табл. 2 результаты измерений коэффициентов отражения и пропускания образцов светорассеивающих стекол марок ОНС1 и ОНС2 с разной вероятностью выживания фотона (и примерно одинаковой геометрической толщины) подтверждают это предположение. В табл. 2 помимо коэффициентов отражения r и R указаны значения коэффициентов пропускания образцов с границами t и без них — T . Мерой поглощенной энергии в каждом случае являются разности $1 - (t + r)$ и $1 - (T + R)$. Цифры, указанные в табл. 2, говорят о том, что $[1 - (t + r)] > [1 - (T + R)]$. Отсюда следует, что в слое с грани-

Таблица 2

Марка стекла	Параметры							
	z , мм	t	T	r	R	$1 - (t + r)$	$1 - (T + R)$	P
ОНС1	0.52	0.157	0.090	0.800	0.870	0.043	0.040	0.07
ОНС2	0.50	0.109	0.099	0.488	0.635	0.403	0.266	0.34

цами поглощается больше света, чем в слое без границ. При этом увеличение поглощения при действии границ проявляется именно в том стекле, которое обладает большим поглощением — ОНС2 (табл. 1). Это видно особенно по данным последнего столбца, где буквой P обозначено относительное увеличение поглощения: $P = \{[1 - (t+r)] - [1 - (T+R)]\} / [1 - (t+r)]$.

6. Таким образом, благодаря разработанной методике оказалось возможным провести сравнительное изучение потерь на поглощение и отражение света рассеивающими слоями, ограниченными френелевскими слоями и тех же слоев, но без границ (или одной из них). Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет выявить наиболее четко выраженные закономерности воздействия пограничных поверхностей, которые можно сформулировать следующим образом.

1. Появление у рассеивающего слоя френелевских границ приводит к перераспределению световых потоков отраженного, пропущенного и поглощенного слоем, и может в несколько раз изменить величину его коэффициента отражения.

2. Соотношение между коэффициентами отражения слоя с френелевскими границами и того же слоя без границ определяется оптической толщиной слоя и индикатрисой рассеяния элементарного объема. При большей оптической толщине слой с границами отражает меньше, чем тот же слой, но без границ. При относительно малых оптических толщинах соотношение обратное.

3. В определенном диапазоне оптических толщин действие френелевского дна приводит к тому, что коэффициент отражения слоя по мере уменьшения оптической толщины возрастает.

4. Доля энергии, поглощаемой в слое, возрастает при появлении у него френелевских границ.

Литература

- [1] Е. М. Фейгельсон, М. С. Малкевич, С. Я. Коган, Т. Д. Коронатова, К. С. Глазова, М. А. Кузнецов. Тр. инст. физ. атмосф. № 1, 3, 1958.
- [2] С. Д. Гутшабаш. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1, 118, 1962.
- [3] Э. Г. Яновичкий. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 7, 1140, 1963.
- [4] R. P. Nemenger. Appl. Optics, 16, 2006, 1977.
- [5] Н. А. Войшвилло. Опт. и спектр., 36, 1161, 1974.
- [6] Н. А. Войшвилло. Опт. и спектр., 3, 291, 1957.
- [7] А. А. Гершун. Тр. ГОИ, 11, 43, 99, 1936.
- [8] Н. А. Войшвилло. Опт. и спектр., 37, 136, 1974.

Поступило в Редакцию 25 ноября 1977 г.