

Законы атмосферной оптики и их использование при определении видимости

Мекшило А. Д.

Белорусский национальный технический университет

Введение

Многие законы оптики были открыты в древности. Так, закон прямолинейного распространения света встречающийся в сочинении по оптике, приписываемому Евклиду. Закон отражения света также упоминается в «Оптике» Евклида. Явление преломления света было известно уже Аристотелю.

Современная атмосферная оптика включает в себя информацию о физическом состоянии атмосферных планет, различные размеры классической оптики, теории переноса излучения атомной и молекулярной спектроскопии, электродинамики.

Истоки современной атмосферной оптики лежат в оптических науках, которые сами во многом формировались по основе наблюдений естественных оптических явлений. В изучении различных атмосферных оптических явлений принимали участие такие ученые, как Ньютон, Эйлер, Ремер, Фуко, Ломоносов и многие другие.

На первых этапах развития атмосферной оптики основное внимание уделялось таким направлениям исследований, как теории видимости, радиационной энергетике атмосферы. В настоящее время она изучает и описывает самые разнообразные оптические явления, как с энергетической точки зрения, так и с точки зрения угловых, спектральных и временных зависимостей характеристик поля излучения и факторов их определяющих.

Недостаточная видимость понимается как временное положение, вызванное погодой или другими явлениями (туман, дождь, снегопад, метель, сумерки, дым, пыль, брызги воды и грязи, слепящее солнце), когда расстояние, на котором рассматриваемый объект возможно отличить от фона, составляет менее 300 метров.

Эти погодные условия оказывают существенное влияние на безопасность дорожного движения. Поэтому очень важно понимать всю суть этого вопроса. [2]

1. Атмосферная оптика и её законы

Атмосферная оптика является частью физики атмосферы — науки о физических процессах в атмосфере Земли (а также и других планет). Тематика физики атмосферы включает теоретическое описание и экспериментальное изучение всех атмосферных явлений. Физика атмосферы и, в частности, оптика атмосферы связаны и с достаточно удаленными по тематике научными дисциплинами, поскольку атмосферные процессы оказывают влияние практически на все аспекты человеческой жизни.

Сферой интересов современной оптики атмосферы являются:

- процессы трансформации в атмосфере и на поверхности энергии излучения Солнца и формирование различных типов собственного излучения как компонентов радиационного баланса планеты;
- процессы распространения и трансформации излучения различных типов (солнечного, теплового, неравновесного), определяющие временные, пространственные, угловые, поляризационные и другие характеристики полей излучения, в частности освещение поверхности;
- поле излучения как источник информации об оптических и физических характеристиках атмосферы и поверхности.

Основные законы оптики:

Закон прямолинейного распространения света: в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно. Опытным доказательством этого закона могут служить резкие тени, отбрасываемые непрозрачными телами при освещении светом источника достаточно малых размеров. На границе раздела двух прозрачных сред свет может частично отразиться так, что часть световой энергии будет распространяться после отражения по новому направлению, а часть пройдет через границу и продолжит распространяться во второй среде.

Закон отражения света: падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред,

восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения γ равен углу падения α .

Закон преломления света: падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина, постоянная для двух данных сред.

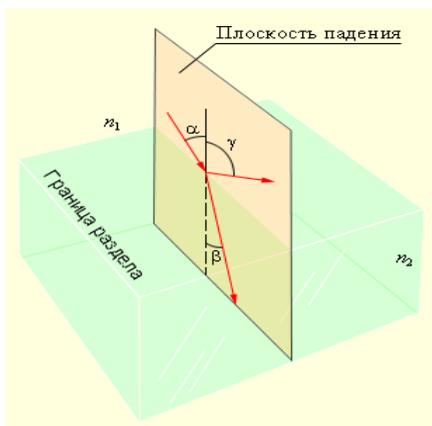


Рис. 1— Законы отражения и преломления: $\gamma = \alpha; n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$.

2. Понятие о прозрачности атмосферы и метеорологической дальности видимости

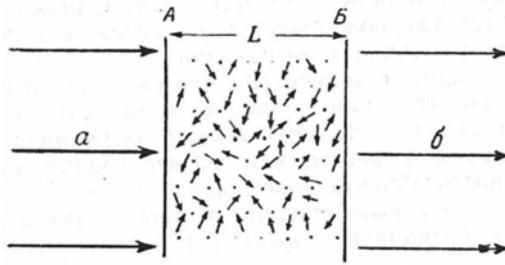


Рис. 2 – Схема ослабления луча, проходящего замутненный слой длиной L

Для оценки прозрачности атмосферы можно рассмотреть схему (рис.2). Пусть слой воздуха, ограниченный стенками AB длиной L содержит во взвешенном состоянии мельчайшие частицы воды и пыли. На границу A этого слоя падает световой луч с энергией a . Энергия этого луча условно изображена в виде линии определенной толщины. На протяжении всего слоя от A до B луч света будет все время сталкиваться со взвешенными частицами, причем каждая как бы захватит энергию этого луча и рассеет ее в разные стороны. Очевидно, что чем больше будет этих взвешенных частиц, тем чаще будут столкновения луча с ними, тем больше энергии будет отнято от этого луча и рассеяно в разные стороны. Поэтому по выходе из границы B луч света будет обладать уже меньшей энергией b по сравнению с той, которую он имел в момент падения на границу A (луч b изображен более тонкой линией, чем луч a). Величина прозрачности τ слоя L определяется как отношение $\tau = b/a$, т.е. как отношение энергии светового луча, выходящего из данного слоя, к энергии луча, входящего в слой.

В дни с очень большими значениями дальности видимости, когда в приземных слоях находится незначительное число взвешенных частиц, прозрачность атмосферы даже в слоях длиной в несколько километров настолько велика, что луч с энергией b мало отличается от луча с энергией a . Следовательно, значение дроби b/a , или прозрачность τ , близко к единице.

Наоборот, дни с плохой видимостью означают, что прозрачность атмосферы вследствие большого количества взвешенных частиц в данном объеме невелика. Другими словами, энергия лучей, выходящих из слоя L , вследствие сильного рассеяния в этом слое может оказаться значительно меньше энергии лучей, входящих в

этот слой. В этом случае величина дроби b/a , а следовательно, и прозрачность τ , может быть близкой или даже равной нулю.

Таким образом, значения прозрачности какого-либо слоя атмосферы (в метеорологии в качестве слоя единичной длины принимается слой, равный 1 км) колеблются между 1, или 100% (полностью прозрачный слой), и 0, или 0% (непрозрачный слой). Когда говорят, что прозрачность слоя равна 0,80, или 80%, то это означает, что из этого слоя выходит 80% энергии упавшего луча, а остальные 20% рассеиваются взвешенными частицами.

Помутнение атмосферы с точки зрения количества взвешенных частиц и их размеров можно характеризовать не только прозрачностью, т. е. не только отношением энергии лучей, вышедших из слоя, к энергии упавших лучей, но также и значением доли рассеянной в этом слое энергии. Для вычисления дальности видимости даже удобнее пользоваться не величиной прозрачности слоя, а именно значением рассеянной энергии лучей, прошедших через этот слой.

Между прозрачностью τ единичного слоя и величиной рассеянной в нем энергии a теория дает такую зависимость:

$$\tau^L = 2,7^{-aL},$$

где 2,7 — основание натуральных логарифмов,

a — показатель рассеяния (показателем ослабления луча). Его численное значение показывает, на какую долю уменьшается энергия луча по прохождении слоя единичной длины.

Во всех странах мира при определении видимости в качестве стандартной длины принят слой атмосферы в 1 км.

Ввиду большой практической значимости определение прозрачности атмосферы давно входит в круг обязанностей гидрометеостанций во всех странах мира. Состояние прозрачности атмосферы помогает понять процессы, происходящие в атмосфере. Проектировщики городов, изыскатели воздушных трасс, строители аэродромов все чаще обращаются за сведениями климатологического характера о прозрачности целых районов страны. Но, помимо этого, значение прозрачности атмосферы (как показателя степени видимости объектов и огней) имеет все большее

и большее значение для обеспечения безаварийной работы всех видов транспорта и особенно авиации. [3]

Но как раз в сфере удовлетворения практических нужд различных «потребителей» мы сталкиваемся с одним усложняющим обстоятельством. Оно заключается в том, что для людей, не искушенных в некоторых особенностях физических представлений, коэффициент прозрачности τ и показатель ослабления α не очень наглядны с точки зрения связи между степенью атмосферного помутнения и видимостью объектов и огней. В самом деле, может ли потребитель (летчик, капитан корабля, железнодорожный машинист и т. д.) наглядно представить себе, с какого расстояния он увидит аэродромные объекты или знаки ограждения фарватера, если ему будет сообщено, что прозрачность слоя в 1 км равна, допустим, 0,58 или, что показатель ослабления в том же слое равен, скажем, 0,36? Едва ли! Именно с этой точки зрения коэффициент прозрачности или показатель ослабления мало удобен для отчетливого представления о дальности видимости объектов и огней.

Однако развитие теории учения о видимости позволило найти замечательно наглядную трактовку понятия прозрачности. Удалось теоретически установить, что прозрачность атмосферы можно трактовать как значение дальности видимости некоторой абсолютно черной поверхности с угловыми размерами не менее 20X20 минут, если только последняя проектируется не на любой случайный фон, а обязательно на фоне дымки в направлении ее наибольшей яркости. Поскольку наибольшая яркость атмосферной дымки достигается в большинстве случаев в горизонтальном направлении, то и значения дальности видимости упомянутого выше идеализированного объекта указываются применительно к этому горизонтальному направлению.

В наклонных направлениях благодаря резкому убыванию с высотой количества замутняющих частиц в большинстве случаев не достигается насыщения яркости слоя — теоретическое соотношение между прозрачностью слоя и дальностью видимости абсолютно черной поверхности оказывается неприменимым. Вот почему в различной метеорологической литературе, в том числе и некоторых Наставлениях, принято говорить о горизонтальной дальности видимости. [5]

Теория устанавливает следующее соотношение между величинами a или ε и дальностью видимости S_m абсолютно черной поверхности:

$$S_m = \frac{a}{\varepsilon}, \text{ или } S_m = \frac{\sigma}{\varepsilon},$$

где ε - порог чувствительности зрения
 σ, a - показатели ослабления видимости

Величина ε попала в выражение для S_m не случайно, поскольку речь идет о дальности видимости некоторого объекта. *Дальность видимости* - это расстояние, на котором под воздействием дымки выравнивается контраст между объектом и фоном, или, точнее говоря, расстояние, на котором яркость объекта кажется на глаз не отличимой от яркости фона; а это выравнивание и происходит в пределах, обусловленных величиной порога контрастной чувствительности зрения. [1]

Замечательная по простоте зависимость между величиной атмосферного помутнения, характеризуемого значениями a или σ и дальностью видимости абсолютно черной поверхности S_m , послужила поводом к заключению международного соглашения, согласно которому во всех странах мира гидрометеорологические станции должны определять именно величину S_m , для которой было принято специальное название метеорологической дальности видимости (поскольку она характеризует оптическое состояние атмосферы и определяется на сети метеорологических станций).

Метеорологическая дальность видимости есть лишь способ наглядного представления прозрачности атмосферы или степени ее помутнения, и ни в коем случае не должен смешивать ее с дальностью видимости реальных объектов. Прозрачность атмосферы и метеорологическая дальность видимости — это синонимы.

3. Метод определения метеорологической дальности видимости

Метод определения метеорологической дальности видимости по контрастам (реальных объектов получил наибольшее развитие

главным образом по той причине, что не требует сооружения на местности искусственных объектов. Три-четыре объекта на местности позволяют охватить измерениями все 10 баллов Международной шкалы видимости. Однако метод имеет главный недостаток — невозможность определения K_0 (или V_0) реального объекта в момент непосредственного измерения метеорологической дальности видимости. Этот недостаток существенно осложняет использование метода. Но главная трудность заключается в том, что практически приходится иметь дело не с одним табличным значением K_0 для данного объекта, а с несколькими его значениями применительно к различным сезонам года, разным метеорологическим условиям, различиям в характере контуров и т. д. Сложность учета многочисленных вариаций значений K_0 для большинства объектов ландшафта и является самым уязвимым местом описываемого метода.

Фотоэлектрический метод. В основе его лежит измерение с помощью фотоэлемента энергии светового луча, прошедшего в атмосфере слой некоторой постоянной длины. Измерение этим методом всего диапазона изменения метеорологической дальности видимости в пределах всей 10-балльной шкалы пока затруднительно. Поэтому данный метод не находит пока еще применения на основной сети ГМС. Зато при измерении меньших значений метеорологической дальности видимости (примерно до 10 км) этот метод позволяет не только делать измерения метеорологической дальности видимости с высокой точностью, но также и непрерывно ее регистрировать.

Нефелометрический метод Устройство нефелометров заключается в следующем. При повышенной мутности воздуха, как известно, бывает хорошо заметен луч автомобильной фары или прожектора. Чем более замутнен воздух, т. е. чем меньше метеорологическая дальность видимости, тем ярче луч, и наоборот. Колебания яркости луча отражают состояние прозрачности атмосферы. Нефелометр представляет собою такой прибор, в котором небольшой объем воздуха, поступающего снаружи в камеру прибора, освещается ярким световым лучом. При изменении прозрачности воздуха яркость луча, наблюдаемого сбоку, меняется, что и измеряется специальным устройством либо с помощью глаза, либо с помощью фотоэлемента. С помощью нефелометров метеорологическая дальность видимости может быть измерена в

открытом море, в воздухе, на ГМС с закрытым обзором, а также в степных районах.

Метод определения метеорологической дальности видимости в светлое время суток Этот метод позволяет полностью избавиться от метода определения метеорологической дальности видимости по контрастам объектов ландшафта с его сложным учетом значений *K₀* объектов. Основы этого нового метода коротко заключаются в следующем . [3]

На местности в 300—400 м от точки наблюдения устанавливается небольшое черное тело в виде почерненного изнутри ящика с открытой полостью, обращенной к наблюдателю. Не обязательно, чтобы ящик проектировался на фоне неба, он может стоять прямо на земле.

На одной визирной линии с черной полостью, на расстоянии 30—40 м, устанавливается другое черное тело малых размеров (примерно с консервную банку) так, чтобы одна полость проектировалась на фоне другой.

При очень прозрачной атмосфере, когда дымка на далекой черной полости не замечается глазом, ближняя черная полость не видна на фоне далекой, глаз видит только последнюю (рис. 2 а). При наличии малейших следов дымки более черная полость ближнего тела будет отчетливо видна на фоне посветлевшей дальней полости (рис. 2 б).

С помощью прибора ИВ-ГГО на наблюдаемую картину, как это уже изложено выше, накладывается изображение участка неба у горизонта (рис. 2 в). Под воздействием увеличивающейся налагаемой яркости контраст между ближней и черной полостями уменьшается. Момент, когда ближняя полость перестает быть видна на фоне дальней, является отсчетным (рис. 2 г) . .

Чувствительность метода оказалась очень высокой. Метеорологическая дальность видимости может быть измерена в пределах 100—120- кратных расстояний до дальней черной полости. Другими словами, имея черное тело на расстоянии в 300 м, мы в состоянии измерить метеорологическую дальность видимости до 30—35 км, т. е. от 2 до 8 баллов включительно. [4]

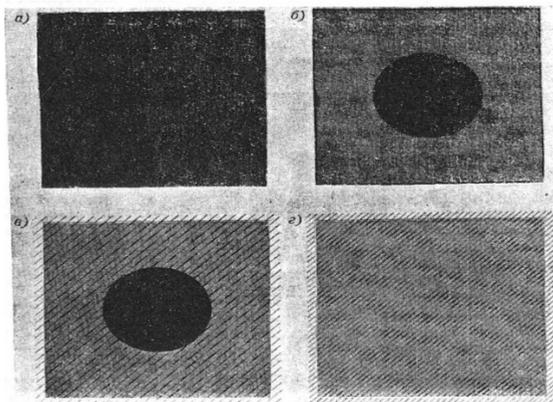


Рис.3- Схема определения метеорологической дальности видимости по методу относительной яркости\

Заключение

В докладе представлены основные законы атмосферной оптики и оптики в целом: закон прямолинейного распространения, закон отражения и закон преломления света. Раскрыта связь этих законов с определением видимости на дороге. Погодные явления оказывают существенное влияние на безопасность дорожного движения.

Очень важно понять, что чем больше содержится мельчайших частиц воды и пыли в воздухе на определенном участке, тем хуже его прозрачность, а следовательно, отношении энергии светового луча, выходящего из данного участка, к энергии, входящей в слой участка будет близкой к нулю. Что может составить аварийную обстановку на дороге. Обычно видимость определяется на участке одного километра. Так что определение видимости является обязательным пунктом метеостанций. Проектировщики дорог, аэродромов всегда обращаются за сведениями климатологического характера о прозрачности даже целых районов.

Кратко рассмотрены вопросы о основных методах определения дальности видимости. К таким методам относят: 1. Определение по контрастам (не требует сооружения на местности искусственных объектов). 2. Фотоэлектрический метод (при

измерении меньших значений метеорологической дальности видимости). 3. Нефелометрический метод (состояние прозрачности атмосферы определяется колебание яркости луча). 4. Метод определения метеорологической дальности видимости в светлое время суток (определяется отсчетный момент, по нему – контраст между дальней полостью и дымкой у горизонта, а затем расчетом определяется метеорологическая видимость).

Литература

1. Тимофеев, Ю. М. Теоретические основы атмосферной оптики: Учеб.пособие для студентов вузов/Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев.- СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
2. Гаврилов, В. А. Прозрачность атмосферы и видимость. – Изд. 2-е,переработ., доп. – Л.: Гидрометеиздат, 1958-167с.
3. Актинометрия и атмосферная оптика/ Глав.геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова. Ленингр. гос. ордена Ленина ун-т имени А.А. Жданова. Ин-т физики атмосферы Акад.наук СССР.-Л.: Гидрометеиздат, 1961-313с.
4. Романов, Г. С. Просветление облачной среды, содержащей капли воды, под действием интенсивного монохроматического излучения/Г.С. Романов, В.К. Пустовалов.- Минск:ИФ АН БССР, 1975 -38с.
5. Сайт «Физика»
<http://www.physics.ru>
<http://www.physics.ru/courses/op25part2/content/chapter3/section/paragraph1/theory.html>

Солнечная радиация и закономерности её распространения

Миронович В.М.

Белорусский национальный технический университет