

**Х. Грин**

**Аэрозоли - пыли, дымы и туманы**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 54  
ББК 24  
X11

X11 **Х. Грин**  
Аэрозоли - пыли, дымы и туманы / Х. Грин – М.: Книга по Требованию, 2024. – 422 с.

**ISBN 978-5-458-42630-5**

Книга является переводом монографии, подготовленной специалистами в области изучения аэродисперсных систем - работниками Британской военно-химической службы. Монография состоит из двух частей: первая посвящена физическим и физико-химическим свойствам аэрозолей, вторая - образованию, применению и разрушению их. Книга представляет большой интерес для научных работников, инженеров-технологов, физиков, физико-химиков, агрохимиков, метеорологов, геофизиков, медиков службы сангигиены и военных специалистов.

**ISBN 978-5-458-42630-5**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2024  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Книжная литература по аэрозолям весьма ограничена, причем большую ее часть составляют монографии, посвященные специальным вопросам или отдельным типам аэрозолей (например, механике аэрозолей, образованию туманов, атмосферным и радиоактивным аэрозолям, атмосферной пыли и пр.). Книг же общего характера, которые могли бы служить учебником или введением в эту область, совсем мало.

Первая по времени появления книга такого рода «Clouds and Smokes» В. Гиббса, изданная на русском языке в 1926 г., давно уже устарела. Монография «Smoke» Уайтлоу-Грея и Паттерсона, вышедшая в русском переводе в 1933 г., посвящена почти исключительно работам самих авторов, сыгравшим, правда, большую роль в развитии науки об аэрозолях. «Schwebstoffe in Gasen» Винкеля и Яндера (1934) и «Les Aérosols» Ави (1956) — небольшие по объему книжки, в которых освещается сравнительно ограниченный круг вопросов. Отдельным аэрозольным проблемам посвящен и изданный Американской комиссией по атомной энергии сборник «Handbook on Aerosols» (1950). Более полный охват материала в очень сжатом элементарном изложении можно найти в книге К. Спурного и др. «Aerosoly», изданной в русском переводе в 1964 г. К сожалению, в ней пропущены такие важные вопросы, как природные облака и образование атмосферных осадков.

Наиболее полное изложение учения об аэрозолях почти во всех его аспектах содержится в предлагаемой вниманию читателей книге Грина и Лейна. Авторы ее — руководящие работники физического отдела Британской военно-химической экспериментальной станции, помимо своей основной работы по военной тематике (отравляющие дымы, дымовые завесы, аэрозольные фильтры к противогазам) много времени уделяли также инсектицидным аэрозолям для борьбы с саранчой и комарами и разработке новых методов исследования аэрозолей, и имеют, таким образом, весьма богатый и разнообразный

опыт в этой области. О хорошем знакомстве авторов с аэрозольной литературой свидетельствует обилие в книге ссылок (более 1300). С некоторыми оговорками можно сказать, что в ней довольно полно отражены и советские работы по аэрозолям.

На всем протяжении книги материал излагается в доступной для широкого круга читателей форме. Авторы предпочитают не углубляться в математический анализ различных теоретических вопросов и в большинстве случаев приводят лишь окончательные формулы без их вывода. Распределение материала по трем основным разделам — теории свойств аэрозолей и происходящих в них процессов, экспериментальным методам исследования и практическому значению аэрозолей, вполне согласуется с назначением книги — дать читателю полное представление об аэрозолях в целом, служить введением в эту область знания и, в известной мере, справочной книгой.

1-е издание книги вышло в 1957 г., а в 1964 г. потребовалось выпустить 2-е издание, в которое было добавлено много нового материала. Заметим, что это единственный до сего времени случай переиздания книги по аэрозолям.

Книга Грина и Лейна не свободна и от недостатков. Местами авторы относятся недостаточно критически к сообщаемому материалу: некоторые работы излагаются незаслуженно подробно, другие — незаслуженно кратко. Язык книги — тяжелый; изложение, формулировки нередко небрежны, встречается много ошибок и неясных мест. Поэтому при переводе книги пришлось делать много мелких исправлений и местами довольно далеко отходить от оригинала. В тех случаях, когда необходимость в этих исправлениях не вызывала сомнений, они вносились нами без всяких оговорок. Когда же речь шла о принципиальных разногласиях между редактором перевода и авторами книги, это указывалось в подстрочных примечаниях. Последние использовались также для разъяснения некоторых вопросов, недостаточно освещенных в книге, и для дополнений, в которых указаны важнейшие работы, пропущенные авторами или опубликованные после окончания работы над книгой. Для того чтобы не увеличивать чрезмерно объема книги, дополнительный материал пришлось излагать чрезвычайно сжато. Так как многие работы, указанные в основном тексте и в дополнениях, мало доступны для советских читателей, мы стремились по возможности давать дополнительные ссылки на русские книги и обзоры, в которых излагаются результаты этих работ.

Несмотря на отмеченные недостатки, книга Грина и Лейна, несомненно, принесет большую пользу широкому кругу читателей различных специальностей, которым приходится иметь дело с аэрозолями. Ввиду доступности книги она особенно полезна для первоначального ознакомления с предметом, и, если, как мы надеемся, в некоторых высших учебных заведениях СССР будут организованы кафедры по аэрозолям или по пылеулавливанию, труд Грина и Лейна послужит прекрасным учебным пособием. Впрочем, благодаря обильному материалу, приведенному в книге и в определенной части, вероятно, неизвестному советским специалистам по аэрозолям, она представляет несомненный интерес и для этой категории читателей.

Книга издается на русском языке с некоторыми сокращениями: опущено изложение некоторых ошибочных или малозначительных работ; материала, не представляющего интереса для советского читателя, например по загрязнению атмосферы в некоторых районах Англии и США; сокращены описания некоторых приборов и пр.

Главы 3, 8, 12, 13 и первая половина 5 переведены Л. В. Стрельцовым, главы 6, 7, 9 и вторые половины 2 и 5 — Е. П. Медниковым, главы 4, 10, 11 и первая половина 2-й — Б. И. Огородниковым и глава 1 — Н. А. Фуксом.

**ПОЛНЫЕ НАЗВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В КНИГЕ  
ЗАРУБЕЖНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ**

A. E. C.	Atomic Energy Commission
A. M. A. Arch. Industr. Hyg. (Hlth)	American Medical Association Archives of Industrial Hygiene and Occupational Medicine (Health since 1955)
A. S. T. M.	American Society for Testing Materials
B. P.	British Patent Specification
C. R. E.	Central Research Establishment, National Coal Board
G. E. C.	General Electric Company. Schenectady
G. R. D., A. F. C. R. C.	Geophysical Research Directorate, Air Force Cambridge Research Center. U. S. A.
H. M. S. O.	Her Majesty's Stationery Office
N. A. C. A.	National Advisory Committee on Aeronautics. Washington, D. C.
O. S. R. D.	Office of Scientific Research and Development, Washington, D. C.
Proc. Verb. de l'U. G. G. I. Lisbon	Procés verbaux de l'Union géodesique et géophysiques internationale. Lisbon
Schr. Deutsch. Akad. Luft.	Schriften der deutschen Akademie der Luftfahrtforschung
S. M. R. E.	Safety in Mines Research Establishment. Sheffield
U. S. Bur. Min. I. C.	U. S. Bureau of Mines, Information Circular

**ЧАСТЬ ПЕРВАЯ**

**ФИЗИЧЕСКИЕ  
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА АЭРОЗОЛЕЙ**

## Глава 1

### ВВЕДЕНИЕ

#### КЛАССИФИКАЦИЯ АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

В прошлом был сделан ряд попыток классификации аэрозолей на основе их природы, происхождения и величины частиц. Эти попытки оказались не вполне успешными из-за неопределенного характера многих аэрозолей и различия между научными и принятыми в обыденной жизни обозначениями различных типов аэрозолей. Мы решили ограничиться в этой книге системами, содержащими лишь медленно оседающие частицы, а именно со скоростью седиментации не больше, чем у капелек воды диаметром 100 мк, и попытались классифицировать аэрозоли отчасти по их природе, отчасти по способу образования дисперсной фазы. На первый взгляд может показаться, что, разделив аэрозоли на три больших класса — пыли, дымы и туманы, можно охватить все случаи, однако при более внимательном рассмотрении оказывается, что многие аэродисперсные системы можно с одинаковым правом отнести к двум классам, а некоторые системы не принадлежат ни к одному из этих классов. Несмотря на существование таких исключений, указанную классификацию целесообразно сохранить.

*Пыли (dusts)* состоят из твердых частиц, диспергированных в газообразной среде в результате механического измельчения твердых тел (как, например, пыль, образующаяся при дроблении и тонком измельчении горных пород и минералов, при бурении и взрывных работах) или под действием аэродинамических сил (например, воздушной струи) на порошкообразные материалы. В обыденной жизни пылью нередко называют осадок пыли на различных поверхностях, легко переходящий обратно в взвешенное состояние. В большинстве случаев пыли — весьма полидисперсные малоустойчивые системы; они содержат больше крупных частиц, чем дымы и туманы, хотя кривые распределения частиц пыли по размеру нередко заходят и в субмикроскопическую область. Счетная концентрация (число частиц в 1 см<sup>3</sup>) в пылях обычно мала по сравнению с дымами и туманами.

К *дымам (smokes)* мы причисляем весьма разнообразную группу аэродисперсных систем, состоящих из частиц с малой упругостью пара и с малой скоростью седиментации под дейст-

вием силы тяжести. \* Весьма важным признаком дымов является способ их образования. Раньше дымами называли лишь аэрозоли, образующиеся при горении и деструктивной перегонке, однако в настоящее время термин «дым» включает многие другие аэродисперсные системы, которые нельзя отнести ни к пылям, ни к туманам, как, например, аэрозоли, образующиеся при возгонке и конденсации паров, а также в результате химических и фотохимических реакций. К типичным представителям дымов следует отнести аэрозоли, образующиеся при конденсации паров стеариновой кислоты, при взаимодействии газообразных аммиака и хлористого водорода, при фотохимическом разложении паров пентакарбонила железа с образованием дыма окиси железа и при окислении паров металлов в электрической дуге. Важным критерием является размер частиц, поэтому даже аэрозоль, образующийся при распылении какого-нибудь раствора и высыхании капелек, следует называть дымом, если образующиеся частицы достаточно малы. Вообще говоря, величина частиц в дымах лежит в пределах от 5 мк до субмикроскопических размеров, т. е. менее 0,1 мк. Если при образовании дыма одновременно образуется какой-нибудь едкий газ или пар, например при обжиге сернистых руд, когда вместе с аэрозолем окиси металла выделяется сернистый ангидрид, такой дым обозначается на английском языке термином *fume*.

*Туманы (mists)* состоят из капелек жидкости, образующихся при конденсации пара или распылении жидкости. При этом в капельках могут содержаться растворенные вещества или суспендированные твердые частицы. Туманы, в особенности природные, состоят из сравнительно крупных капелек диаметром до 10 мк и выше, и счетная концентрация их обычно невелика. Характерным признаком, отличающим туманы от дымов, служит размер частиц. Тонкодисперсные аэрозоли, например образующиеся при взаимодействии паров серного ангидрида и воды, иногда называют туманами, однако, согласно нашей классификации, их лучше причислить к дымам. Если концентрация тумана настолько велика, что он заметно снижает видимость, его называют по-английски *fog*, хотя граница между понятиями *fog* и *mist* весьма расплывчата. Капельки и частицы различных атмосферных загрязнений и пыли образуют в атмосфере *дымку (haze)*, представляющую собой комбинацию из всех трех основных классов аэрозолей, а не особый класс. Термином *смог (smog = smoke + fog)* называют систему, образующуюся в результате взаимодействия природного тумана с газовыми выбросами из заводских и печных труб. Это обозначение стали применять также к любым раздражающим и вредным аэрозолям в атмосфере. Так, Лос-Анжелосский смог представляет собой сложную смесь едких газов и мелких аэрозольных частиц, не связанную с природным водяным туманом.

\* В нашей технической литературе скорость седиментации обычно называют «скоростью витания». Но слово «витание» означает «пребывание, нахождение» и им нельзя, по нашему мнению, обозначить какую-либо скорость. (Прим. ред.)

Газы, содержащие ионы и ядра, обладающие нередко размерами молекулярных агрегатов, также можно отнести к аэродисперсным системам. Их можно назвать ионными и ядерными аэрозолями; они содержат центры конденсации, на которых происходит образование видимых аэрозолей. Некоторые аэрозоли, которые трудно отнести к одному из упомянутых выше классов, можно назвать облаками, например облако из ледяных кристаллов.

Общий термин *аэрозоль* был предложен проф. Доннаном в конце первой мировой войны для обозначения тонких аэродисперсных систем, таких как ядовитые дымы фенилхлорарсина, которые начали применять в то время. Независимо от Доннана этим термином начал пользоваться Шмаусс, которому принадлежит и первая статья, где было упомянуто слово аэрозоль\*.

Указанные авторы считали аэрозоли аналогами систем с жидкой средой — гидрозолей, однако вскоре стало ясно, что эти два класса дисперсных систем существенно различны вследствие присущей аэрозолям неустойчивости. К сожалению, термин аэрозоль в последние годы начали применять к системам, для которых он никогда не предназначался, и стали называть аэрозолями любые аэросуспензии. В этой книге термин аэрозоль употребляется лишь в его первоначальном смысле, т. е. в применении к системам с достаточно мелкими частицами и обладающим поэтому некоторой степенью устойчивости, по крайней мере по отношению к седиментации. К этой категории принадлежат пыли с мелкими частицами, дымы и некоторые туманы. Кроме того, принято считать, что аэрозоли могут быть легко обнаружены по рассеянию ими видимого света. Поэтому вряд ли можно причислить к настоящим аэрозолям ионные облака\*\*.

### ПРИРОДА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Пыли обычно состоят из частиц неправильной формы — единичных или образующих агрегаты. Иногда эти частицы обладают от-

---

\* Schmauss A., Umschau, 24, 61 (1920).

\*\* Хотя авторы и правы, говоря о больших трудностях при классификации аэрозолей, все же предложенная ими классификация не может не вызвать серьезных возражений вследствие ее расплывчатости. Не вызывает сомнения лишь определение пылей, как систем с твердыми частицами диспергационного происхождения. Что касается остальных классов, нам представляется более целесообразным называть туманами все системы с жидкими частицами, а дымами — конденсационные аэрозоли с твердыми частицами. То, что, например, табачный дым придется при этом называть туманом, не должно нас смущать. Нельзя разделить и мнения авторов о пределах размеров частиц в системах, которые можно называть аэрозолями. В последнее время началось исследование высокодисперсных аэрозолей с размерами частиц порядка нескольких миллиметров. Их невозможно обнаружить оптическими методами, и все же это настоящие, весьма интересные по своим свойствам аэрозоли.

С другой стороны, авторы устанавливают верхний предел размеров частиц в аэрозолях порядка 100 мк, между тем в грозовых и градовых облаках содержится много значительно более крупных капель. (Прим. ред.)

четливой кристаллической формой, но и в этом случае исследование пылей осложняется тем, что их свойства зависят от «факторов формы» и поддаются строгому анализу гораздо труднее, чем в аэрозолях со сферическими частицами. Аналогично обстоит дело и во многих дымах. Даже в том случае, когда аэрозоль состоит первоначально из твердых сферических частиц, в нем в процессе коагуляции образуются агрегаты неправильной формы. Вполне шарообразные частицы в течение всей жизни аэрозоля наблюдаются лишь в туманах. Во всех этих системах частицы могут обладать положительными или отрицательными зарядами различной величины.

### **КРАТКИЙ ОБЗОР СВОЙСТВ АЭРОЗОЛЕЙ**

Одной из задач исследования пылей, дымов и туманов является выяснение свойств отдельных частиц, другой задачей — изучение свойств аэрозолей как систем. Исследование свойств индивидуальных частиц дало много ценных данных, особенно для понимания процессов образования аэрозолей, их движения, диффузии, оптических и электрических свойств. Однако нередко аэрозоли приходится рассматривать как системы, аналогичные газам, особенно при изучении атмосферных аэрозолей и турбулентной диффузии аэрозолей (иногда с учетом их седиментации под действием силы тяжести). Объектами исследования некоторых оптических свойств аэрозолей, например при маскировке предметов дымовыми завесами, также служат не отдельные частицы, а системы частиц.

Образование дымов и туманов при конденсации паров и в результате газовых химических реакций — примеры процессов, к которым были успешно применены основные физико-химические законы. Это относится и к испарению капель и к росту гигроскопических частиц за счет поглощения ими пара; для достаточно мелких частиц нужно также учитывать эффекты кривизны поверхности частиц и их заряда.

Необходимо подчеркнуть отличительное свойство аэрозолей — их неустойчивость. Происходящие в них изменения вызываются рядом причин. Частицы могут исчезать из аэрозоля благодаря седиментации или диффузии к стенкам сосуда, в котором они находятся, или благодаря испарению. Размер капелек растворов может уменьшаться за счет испарения, пока не будет достигнуто равновесие между капельками и окружающей средой. Крупные капельки могут расти за счет более мелких. Броуновское движение и столкновения между частицами, обусловленные различной скоростью седиментации, приводят к образованию агрегатов или более крупных капель, выпадающих из аэрозоля вследствие седиментации. В этом отношении между аэрозолями и гидрозолями существует глубокое принципиальное различие. В аэрозолях нет ничего, аналогичного стабилизирующему двойному электрическому слою или явлению пептизации гидрозолей. Одно время полагали,

что аэрозоли могут стабилизироваться адсорбированной на поверхности частиц газовой оболочкой, однако никому не удалось доказать ни существования такой оболочки, ни ее стабилизирующего действия. Заряды на аэрозольных частицах изменяют свойства и устойчивость аэрозолей, и некоторые авторы полагали, что униполярная зарядка аэрозолей в отсутствие стенок, например в атмосферных облаках, может значительно повысить их устойчивость и приблизить их к гидрозолям.

В некоторых аэрозолях наблюдаются характерные оптические явления, красивые цветовые эффекты, объясняемые на основе теории рассеяния электромагнитных волн сферическими частицами. Хотя эта теория создана давно, лишь сравнительно недавно были составлены основанные на ней таблицы, позволяющие сопоставить экспериментальные результаты с теорией.

Несмотря на то, что аэрозоли широко распространены в природе и непрерывно образуются в результате человеческой деятельности, научное их исследование началось сравнительно недавно. Во второй половине XIX века несколько крупных физиков и математиков, заинтересовавшихся специфическими свойствами аэродисперсных систем, занялись их изучением. Вывод Стоксом формулы для сопротивления вязкой среды движению частиц, качественное исследование рассеяния света дисперсными системами, предпринятое Тиндалем, и количественное исследование того же явления, принадлежащее Релею, изучение атмосферных ядер конденсации Айткеном — примеры исследований, послуживших фундаментом для дальнейшего развития физики аэрозолей. Однако в начале XX века работа в этом направлении замедлилась в связи с возникновением новой физики и, может быть, прекратилась бы совсем, если бы не интерес к аэрозолям, появившийся у работников в других отраслях науки и техники. Нужды промышленности, медицины (профилактики и терапии), сельского хозяйства и метеорологии настоятельно требовали изучения различных аспектов аэродисперсных систем. Во время первой и, особенно, второй мировой войны были предприняты обширные исследования химии и физики аэрозолей, в особенности дымовых завес; в результате, за сравнительно короткий срок в этой области были достигнуты большие успехи.

Дымы и пыли в городах и промышленных центрах в некоторых случаях просто неприятны для обитателей, в других же представляют серьезную угрозу здоровью населения. Поэтому возникла потребность в разработке новых методов, необходимых для основательного научного исследования промышленных аэрозолей. В атомной промышленности приобрели большое значение радиоактивные аэрозоли, по своим общим свойствам не отличающиеся от обычных (неактивных) аэрозолей. Состоящие из радиоактивных частиц аэрозольные облака, образующиеся при атомных взрывах, могут служить примером создания гигантских аэрозольных масс руками человека.