

И. В.Петрянов
А. Г.Сутугин

Ш*ученые*
дэ
кольники*

Вездесущие аэрозоли





ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ ПЕТРЯНОВ — видный советский ученый, физико-химик, академик АН СССР с 1966 г. И. В. Петрянов родился в 1907 г., окончил Московский университет в 1931 г. Почти 45 лет работает в Физико-химическом институте им. Л. Я. Карпова, профессор Московского химико-технологического института им. Д. И. Менделеева. Один из немногих исследователей, развивающих новую, очень важную область науки — учение об аэрозолях. И. В. Петрянов — Герой Социалистического Труда, награжден тремя орденами Ленина, лауреат Ленинской и Государственной премий СССР. Лауреат премии ЮНЕСКО — Калинга за популяризацию научных знаний. Председатель ВОО. И. В. Петрянов — активный общественный деятель.



АЛЕКСАНДР ГЕОРГИЕВИЧ СУТУГИН (1940—1988) — доктор химических наук, профессор. После окончания Московского химико-технологического института им. Д. И. Менделеева с 1962 г. работал в НИФХИ им. Л. Я. Карпова. Вся его научная деятельность была посвящена исследованию аэрозолей. В 1974 г. он организовал лабораторию динамики аэроколлоидов. Основные работы А. Г. Сутугина посвящены исследованию кинетики образования высокодисперсных аэрозолей. Они хорошо известны исследователям всего мира. За прикладные работы в области образования аэрозолей в 1982 г. А. Г. Сутугин удостоен Государственной премии СССР.

Библиотечка
Детской
энциклопедии

Редакционная
коллегия:
И. В. Петрянов
(главный редактор)
И. Л. Кнуляни

ш*ученые*
дэ
кольнику

И. В. Петрянов
А. Г. Сутугин

Вездесущие аэрозоли



Москва
«Педагогика», 1989

Рецензент

доктор физико-математических наук, профессор
В. А. Волощук

Петрянов И. В., Сутугин А. Г.

ПЗ1 Вездесущие аэрозоли. — М.: Педагогика, 1989. — 112 с.: ил. — (Б-чка Детской энциклопедии «Ученые — школьнику»).

30 коп.

ISBN 5-7155-0126-1

В книге известного советского ученого академика И. В. Петрянова и доктора химических наук А. Г. Сутугина рассказывается о важной роли, которую играют в жизни природы и человека аэрозоли — мельчайшие частицы вещества, рассеянные в атмосфере планеты.

Школьники узнают об успехах ученых в борьбе с отрицательным воздействием аэрозолей на окружающую среду, о том, как человек учится использовать их для получения новых материалов, защиты урожая, обеспечения работы транспортных средств и энергетических установок.

Для старшеклассников.

П 4306000000(4802000000)—090

005(01)—89

КБ 55—46—1988 ББК 24.5

© Издательство «Педагогика», 1989

Все мы знаем, что самое нужное для человека — воздух, что воздух — это смесь азота и кислорода с примесями водяного пара, диоксида углерода и инертных газов. Специалисты по физике атмосферы считают воздух аэрозолем, поскольку кроме смеси газов он всегда содержит частицы твердых и жидких веществ в количестве от миллиона до миллиарда на 1 м^3 . Хотя по массе содержание этих частиц невелико: оно измеряется микрограммами на 1 м^3 и находится на уровне содержания таких редких газов, как ксенон и криптон. Очень многие свойства воздуха, в частности его пригодность для дыхания, прозрачность, способность участвовать в образовании облаков и атмосферных осадков, зависят именно от присутствия этих частиц.

Итак, мы живем на дне аэрозольного океана. Что же такое аэрозоли? Аэрозоли — это один из видов дисперсных систем. Дисперсными системами называются неоднородные смеси веществ, в которых можно выделить, по крайней мере, две разные фазы. Например, многие сплавы металлов (поскольку они представляют собой смеси кристалликов разного строения и состава), гидрозолы (т. е. жидкости, в которых взвешены твердые или жидкие частицы). Гидрозолями являются морская и речная вода, молоко, да и вообще все жидкости, из которых с помощью специальных приемов не удалены частицы пыли.

В аэрозолях выделяют дисперсионную среду (т. е. сплошную фазу, в которой взвешены частицы), роль которой обычно играет воздух, но это может быть и любой другой газ.

Воздух — это разбавленный аэрозоль. Нас окружает множество привычных объектов, содержащих гораздо большее количество дисперсной фазы: облака и туманы, дым из труб, пыль над дорогой и цветочная пыль-



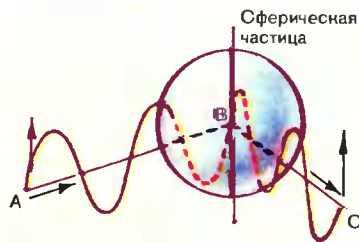
да над цветущим полем, дымы костров и пожаров. Без одних видов аэрозолей человечество не может существовать, другие причиняют неудобства, ущерб здоровью и природе. С глубокой древности люди используют аэрозоли для своих нужд — дымы сигнальных костров, дымы для копчения мяса и рыбы, распыленное топливо в топках котельных и в цилиндрах двигателей, камерах сгорания. Аэрозоли защищают урожай от вредителей и животных, от болезней, наносят на поверхности защитные покрытия, служат для получения новых материалов с необычными свойствами. Человек использует специально полученные аэрозоли для разрушения других, вредных аэрозолей.

Аэрозоли могут обернуться кошмаром человечества, если империалистам удастся развязать новую войну. Ведь самые варварские виды оружия — химическое и биологическое — используются именно в виде аэрозолей. В радиоактивную пустыню могут превратить планету радиоактивные частицы, образующиеся при ядерных взрывах и разрушении атомных электростанций. А густой дым пожаров ядерной войны может свергнуть планету в новый ледниковый период.

Знания о свойствах и поведении аэрозолей полезны каждому человеку и в повседневной жизни.

Аэрозоли в природе

Зори, радуги и глории. Леонардо да Винчи первым понял, что удивительные краски рассветных и закатных зорь объясняются присутствием в атмосфере мельчайших пылинок. В то время еще не существовало ни представлений о волновой природе света, ни тем более о связи между интенсивностью рассеяния света и длиной волны излучения. Но уже было известно, что белый солнечный луч может быть разложен на цветные составляющие, и Леонардо да Винчи догадался, что



Рассеяние
электромагнитного
излучения сферической
капель.

различные составляющие солнечного света могут по-разному ослабляться взвешенной в атмосфере пылью.

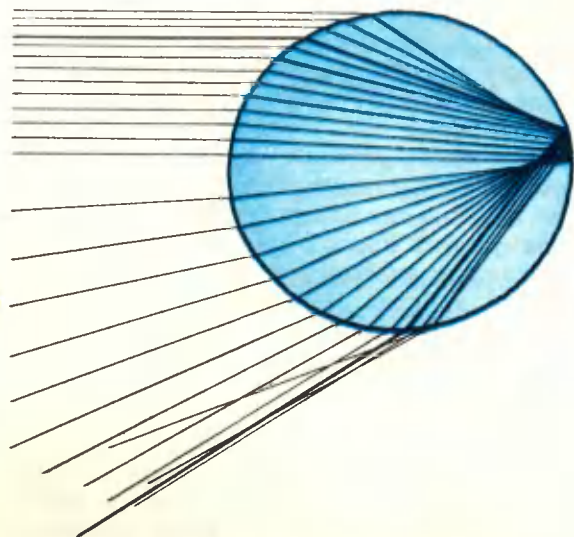
На большую высоту в атмосфере поднимаются лишь достаточно малые частицы, размер которых сравним с длиной волны видимого света. Рассеяние света на таких частицах отличается интереснейшими особенностями. Электрическое поле световой волны возбуждает колебания в частице, и она начинает переизлучать энергию этих колебаний подобно антенне. При этом энергия излучается во всех направлениях. В результате энергия излучения, распространяющаяся в исходном направлении, уменьшается, происходит рассеяние света. Кроме того, часть энергии излучения может поглощаться в частице, расходоваться на ее нагревание. Энергия нагрева передается молекулам воздуха, поглощение тоже ведет к потерям энергии излучения. Как установил английский ученый Дж. У. Рэлей, количество рассеянной частицей энергии обратно пропорционально четвертой степени длины волны излучения. Это значит, что наиболее коротковолновая часть солнечного спектра — синяя — рассеивается значительно лучше красной, длинноволновой. Поэтому небо и кажется синим. Когда же Солнце стоит низко, его лучи должны проходить через сильно запыленный приземный слой. Красные лучи рассеиваются меньше, поэтому Солнце и кажется красным. Чем выше поднимается в атмосфере мелкая пыль, тем большую

часть неба охватывает заря. Наиболее красочные зори наблюдаются после вулканических извержений, забрасывающих пыль в стратосферу. Из-за неоднородностей распределения пыли краски зари рисуют в небе причудливые картины.

Интересный вид имеет угловая зависимость интенсивности рассеянного частицей монохроматического излучения, так называемая индикатриса рассеяния. Она имеет вид замкнутой кривой с «лепестками», т. е. в некоторых направлениях свет рассеивается во много раз лучше, чем в других. Положения «лепестков» индикатрисы зависят от длины волны. Поэтому, если осветить частицы одинакового размера белым светом, при наблюдении с одних направлений они будут казаться красными, а с других — зелеными. Это явление можно использовать для определения размера частиц, но только если они одинаковые, монодисперсные. То же явление объясняет красочность оперения колибри — перья этих тропических птичек содержат только черный краситель, но из-за соизмеримости диаметра мельчайших элементов перьев с длиной волны света они кажутся разноцветными.

Способность частиц рассеивать свет характеризуют удельным сечением светорассеяния, т. е. отношением площади сечения частицы к ее массе. Поскольку площадь сечения пропорциональна квадрату размера, а масса — кубу, получается, что удельное сечение растет линейно с уменьшением размера частиц. Поэтому любое вещество, будучи раздробленным на частицы размером порядка длины волны, обладает очень большой способностью рассеивать свет. И хотя вертикальный столб атмосферы содержит 10^{25} газовых молекул и только 10^{10} аэрозольных частиц, прозрачность атмосферы определяется именно присутствием в атмосфере аэрозолей.

Вследствие особенностей рассеяния электромагнит-



Преломление
света в
дождевой
капле.

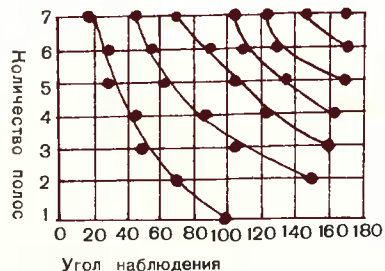
ной волны на частицах, имеющих сравнимый с длиной волны размер, сечение рассеяния может оказаться даже в несколько раз больше геометрического. Для частиц же, меньших длины волны, сечение света много меньше геометрического и быстро убывает с уменьшением размера частиц — обратно пропорционально шестой степени размера. Поэтому самые мелкие частицы — мельче 10^{-7} м — оптически неактивны в атмосфере.

Присутствие крупных частиц в атмосфере является причиной многих оптических явлений, прежде всего всем известных радуг. Механизм их появления может быть объяснен на основе законов геометрической оптики, поскольку при рассеянии света на частицах, много больших длины волны, можно забыть о волновой природе света (см. рис. на с. 8). Угол, под которым преломленные солнечные лучи выходят из взвешенной в

воздухе водяной капельки, составляет около 138° к плоскости падения солнечных лучей. Коэффициент преломления зависит от длины волны, поэтому дважды преломленные лучи, имеющие различную длину, т. е. различный цвет, выходят из капельки под несколько различными углами и рассеянный свет виден в виде радужной полосы. Радуги можно видеть по обе стороны от пути солнечного луча. Но и под радугой, видимой по одну сторону от направления солнечного луча, иногда можно видеть еще одну-две-три дополнительные дуги. Их появление все же связано с волновой природой света с интерференцией преломненных лучей (см. рис. на с. 10). Однако дополнительные дуги видны относительно редко. Ширина дуги зависит от размера капелек. Если капельки достаточно малы, основная и дополнительная радуги отделены друг от друга большими угловыми промежутками. Крупные капельки дают узкие дуги, расположенные близко друг от друга. Практически же в воздухе чаще всего присутствуют капельки различных размеров. Из-за этого происходит наложение радуг друг на друга, радуги становятся белесыми или исчезают вовсе.

Расстояние между основной и дополнительными дугами можно использовать для определения размера капелек, но следует помнить, что на положение радуг влияет еще и форма капелек. При падении капелька сплющивается, приобретает форму эллипсоида. Например, капелька диаметром 1 мм деформируется настолько, что преломленные лучи выходят из нее под углом 149° , а не 138° .

Дифракцией света на мелких капельках объясняются глории, или венцы, — радужные кольца, видимые иногда вокруг Солнца или Луны под углом 26° к направлению на светящийся объект. Специфичны явления, обусловленные рассеянием света на мелких ледяных кристаллах. Это рассеяние сильно зависит от на-



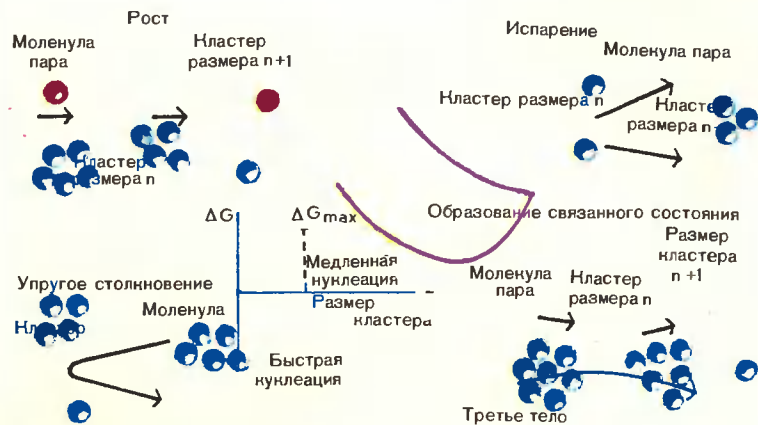
Интерференция света
при образовании
вторичных радуг.

правления наблюдения. Если в атмосфере происходят процессы перемешивания воздуха, то кристаллики ориентируются хаотично. Рассеяние света в этом случае приводит к появлению гало (ложных) солнц и лун, имеющих вид ярких белых пятен или колец. В спокойной морозной атмосфере ледяные кристаллы медленно оседают, ориентируясь одинаково, так, чтобы скорость падения была наименьшей. При такой ориентации наибольшее рассеяние света происходит в вертикальных направлениях и гало имеет вид светящегося столба над источником света.

Способность аэрозольных частиц сильно рассеивать свет играет большую роль в природе, кроме того, она применяется для определения концентрации и размера частиц. В фотоэлектрических аэрозольных счетчиках тонкая струйка аэрозоля пересекает в темной камере луч света. Сбоку или под углом к лучу располагается фотоумножитель — устройство, способное регистрировать кванты света. Пока воздух в камере чист, свет практически не рассеивается и фотоумножитель не дает регистрируемого тока. Стоит аэрозольной частице пересечь луч, и она становится видимой как вспышка света, порция которого попадает на фотоумножитель и рождает электрический импульс, величина которого зависит от размера частицы. Импульсы сосчитывают, ранжируют по размеру и получают сведения о распределении частиц по размерам.

Если бы в атмосфере не было пылинок. Человек живет плодами земли. А земля родит, только если дожди приносят влагу. Дождь идет из облака, а облако — это водяной аэрозоль. Облако образуется при конденсации паров воды, испарившейся из океанов, морей, озер. Температура атмосферы падает с высотой. Поэтому пар воды, поднимаясь, становится пересыщенным и должен конденсироваться. Но зарождение центров конденсации в чистом паре возможно, только если переохлаждение достаточно велико, чтобы создалось критическое пересыщение пара (отношение давления пара к давлению насыщенного пара при данной температуре). Для паров воды эта величина составляет 4—5, а это значит, что пар, насыщенный при 20°C, должен охладиться до —30°C для того, чтобы началась конденсация. Такая низкая температура в летнее время достигается только на высоте нескольких километров — в верхней тропосфере. Однако мы знаем, что облака образуются и существуют на меньших высотах, иногда всего несколько сотен метров. Даже у самой поверхности земли летними вечерами стелются туманы. Конденсация пара в нижних слоях атмосферы возможна благодаря присутствию в воздухе мельчайших частиц, которые могут служить ядрами конденсации. Размером они 10^{-8} — 10^{-7} м, а их количество в сельской местности, вдали от городских источников загрязнения воздуха, составляет порядка несколько миллиардов на 1 м^3 , и даже над Антарктидой, где воздух считается наиболее чистым, их не меньше сотни миллионов на 1 м^3 .

Для образования и роста жидких капелек в чистом паре необходимо большое пересыщение. Если же в паре присутствуют «готовые» частицы размером 10^{-7} м, то для конденсации на них достаточно пересыщения всего 1,03—1,05, а такое пересыщение достигается при переохлаждении пара всего на несколько градусов. Еще



Процесс нуклеации аэрозоля.

больше облегчается конденсация пара, если аэрозольные частицы состоят из растворимых солей. Над растворами давление насыщенного пара ниже, чем над чистыми жидкостями. Для конденсации на растворимых частицах достаточно пересыщения, меньшего 1,01.

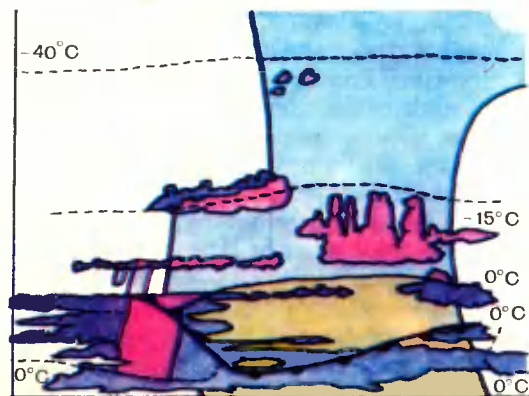
Если бы в атмосфере не было ядер конденсации, образование облаков и туманов в нижних слоях атмосферы было бы невозможно. Атмосферные осадки происходили бы в виде инея или росы, и только часть пара успевала бы подняться в верхние слои атмосферы, где возникали бы перистые или слоистые облака.

Дожди идут из кучевых облаков в нижних слоях тропосферы. А почему из облака вдруг начинает идти дождь? Механизм образования дождя различен в зависимости от того, температура облака выше или ниже нуля. В умеренных широтах даже летом осадки образуются в облаках, плывущих в небе выше нулевой изотермы, где $t < 0$. Хотя температура облака ниже нуля,

оно состоит из капелек воды, а не частиц льда. Как для конденсации пара необходимо пересыщение, так и для замерзания воды нужно сильное переохлаждение. Это только в сосудах вода замерзает при нуле, потому что там есть стенки и не нужно затрат работы на создание поверхности. Капля же чистой воды замерзнет только при -40°C . Среди аэрозольных частиц, присутствующих в атмосфере и играющих роль ядер конденсации, изредка встречаются ядра замерзания. Их много меньше, чем ядер конденсации, — всего тысячи на 1 м^3 . Наиболее активны частицы веществ, кристаллическая структура которых близка к структуре льда. Если такая частица столкнется с переохлажденной капелькой воды, произойдет замерзание. А над поверхностью льда давление насыщенного пара ниже, чем над жидкой водой. Поскольку давление водяного пара в облаке равно насыщенному по отношению к жидким капелькам, оно является пересыщенным по отношению к льдинке, и замерзшая капелька будет расти, масса ее увеличится, она начнет падать. Аэрозольные частицы могут витать в облаке, пока размер их относительно мал, не более нескольких микрометров. Падающая частица в процессе роста растет и упадет на землю дождевой каплей.

Ледяные частицы в облаках образуются и иным путем. Замерзание капелек может происходить при столкновении с заряженными частицами. Крупные частицы минеральной пыли могут вызывать замерзание капелек, даже если их кристаллическая структура иная, чем у льда. Но в этом случае активность частиц как ядер замерзания меньше — замерзание может произойти при более низкой температуре. На частицах некоторых веществ ледяные кристаллы могут формироваться путем конденсации пара.

Если бы ледяных ядер в атмосфере не было, картина выпадения осадков в умеренных широтах была бы



Распределение жидких капель и снежинок на различных высотах относительно вертикального профиля температур (цветом показаны: желтым — град, голубым — мелкие кристаллы снега, синим — водяные капли, фиолетовым — смесь водяных капель и кристаллов льда).

совсем иной. Дожди были бы более редкими, но сильными. Большую роль играли бы осадки в виде изморози и инея. В результате изменился бы облик умеренного пояса. Условия для земледелия тоже были бы хуже, поскольку увеличилась бы нерегулярность осадков.

В тропиках дождь идет обычно из облаков, расположенных ниже нулевой изотермы. Капли вырастают до крупных размеров путем коагуляции, т. е. последовательных столкновений и слияний. Но коагуляция протекает достаточно быстро только в плотных облаках, да и то при наличии сильной турбулентности и электризации капелек. Электростатическое притяжение между капельками во много раз увеличивает вероятность их столкновения.

С электризацией облачных капелек связано общеизвестное, но все же таинственное и грозное явление — молния. Хотя электрическую природу молнии американский ученый Б. Франклин понял более двухсот лет назад, детальный механизм ее возникновения остается неясным до сих пор. Есть несколько механизмов зарядки аэрозольных частиц. Например, заряженные частицы могут образоваться конденсацией пара на газовых

ионах. При этом на отрицательных ионах пар конденсируется легче, а в облаках происходит накопление как раз отрицательного заряда. Но в облаках не должно достигаться пересыщение, достаточное для конденсации на ионах, — оно составляет около двух. При дроблении растворов электролитов происходит разделение заряда, поскольку у поверхности обычно концентрируются ионы какого-либо одного сорта. А облачные капельки — это тоже растворы электролитов. Баллоэлектрический эффект (зарядка при дроблении жидкостей) происходит и в облаках. Но почему же накапливаются именно отрицательные заряды?

При грозовых разрядах происходит образование окислов азота, которые с дождевой водой поступают в почву и способствуют сохранению ее плодородия. Однако грозы — серьезная помеха для безопасности полетов самолетов. Поэтому изучение механизма грозовых разрядов весьма актуально.

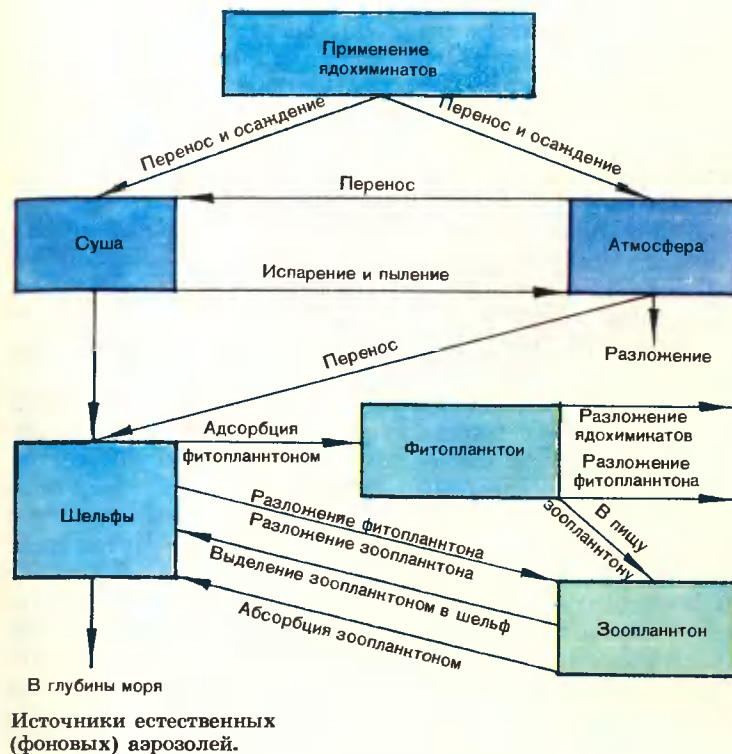
Предположительно, аэрозоли играют роль и в возникновении шаровых молний — феномена еще более загадочного, чем обычные, линейные разряды. Более понятен механизм другого электрического атмосферного явления — огня святого Эльма, которые возникают в насыщенной электричеством грозовой атмосфере вблизи острых оконечностей предметов, например у концов мачт парусных кораблей. Причиной свечения в этом случае является коронный разряд с поверхности заряженных капелек. А капельки образуются при электростатическом распылении воды, смачивающей поверхности. Напряженность электрического поля достигает наибольших значений там, где выше кривизна поверхности. При напряженности в десятки киловольт на 1 см электрическое поле способно распылять жидкости. Это явление используют при окраске поверхностей — на форсунке, через которую распыляется краска, подают высокое напряжение, в результате рас-

пыль становится более тонким, а окраска — более равномерной.

Откуда берутся аэрозольные частицы в атмосфере? Источники поступления аэрозольных частиц в атмосферу делят на естественные и антропогенные, т. е. связанные с деятельностью человека. Аэрозоль, содержащийся в атмосфере вдали от мощных источников, как естественных (извержения вулканов, пыльные бури, лесные пожары), так и антропогенных (в результате человеческой деятельности), называется фоновым. Именно этот аэрозоль ответствен за оптические явления в атмосфере, за образование облаков и осадков. Главных источников фонового аэрозоля три.

Первый называют континентальным: частицы горных пород, почвы, мельчайшие песчинки, сдуваемые ветром. Частицы эти имеют размер от нескольких до сотен мкм. Они всегда содержат кремний и алюминий (основные элементы земной коры), и по их присутствию всегда можно сделать вывод о происхождении частиц. Именно среди континентального аэрозоля попадают частицы, способные служить ядрами замерзания для облачных капель.

Второй важнейший компонент фонового аэрозоля — морской, частицы морской соли, которые играют роль ядер конденсации. На них образуются облачные капельки. При волнении поверхность моря покрывается пузырьками пены, которые через некоторое время лопаются. При разрушении оболочки пузырька диаметром 2 мм образуется около 2000 капелек диаметром несколько больше мкм. При их высыхании образуются частицы морской соли диаметром около 0,1 мкм — это и есть ядра конденсации. При разрушении пузырька возникает кольцевая волна, направленная к его центру, рождающая струйку воды, направленную вверх. Разрушаясь, эта струйка дает несколько капель диаметром



около десятка мкм. При высыхании этих капелек образуются более крупные солевые частицы, называемые гигантскими ядрами конденсации. Для морских аэрозолей характерно присутствие элементов, составляющих морскую соль, — натрия, магния, хлора, брома — в определенных отношениях.

Третий компонент фонового аэрозоля образуется в результате химических и фотохимических реакций

между веществами, выделяемыми растениями, и некоторыми компонентами атмосферного воздуха, в первую очередь окислами азота, образующимися при грозových разрядах. Каждый, кому приходилось видеть леса в тихую солнечную погоду с самолета или с горы, помнит голубую дымку над вершинами деревьев. Это естественный фотохимический смог — аэрозоль, образующийся при конденсации продуктов химических реакций между такими выделяемыми растениями веществами, как скипидар, и окислами азота. Запах озона в сосновом лесу после грозы образуется в качестве побочного продукта при взаимодействии скипидара с двуокисью азота.

Частицы естественных смогов (размером до 0,1 мкм) определяют прозрачность атмосферы в наиболее чистых регионах планеты. Более крупные частицы образуются при горении древесины. Леса умеренной зоны обязательно начинают гореть, если 30—40 дней держится сухая погода. В результате один и тот же участок леса выгорает раз в 100—150 лет, и ученые-лесоведы считают это даже полезным для лесов, в которых не ведется культурное лесное хозяйство. Лесные пожары, а также преднамеренное выжигание тропических лесов при подсечно-огневой системе земледелия, которая до сих пор практикуется в некоторых развивающихся странах, дают ежегодно несколько десятков Мт аэрозолей. Таким путем в атмосферу поступает до 200 Мт аэрозолей. Для сравнения скажем, что морской соли в атмосферу поступает примерно столько же.

Мощным источником аэрозоля может стать извержение вулкана. В этот момент в атмосферу выбрасывается 1000 Мт аэрозоля — больше, чем все естественные источники за целый год. Но такие большие извержения случаются раз в несколько столетий. Поэтому содержание вулканических аэрозолей в атмосфере колеблется в широких пределах. Извержения выносят в

атмосферу первичный аэрозоль — продукты конденсации испаренных горных пород, пыль, образующуюся при взрывном разрушении вулкана, — и вторичный, образующийся в результате фотохимических реакций газообразных продуктов извержения, в первую очередь диоксида серы, превращающегося в серную кислоту или сульфат аммония. Особенностью вулканических аэрозолей является то, что они поступают не в приземный слой, а в верхнюю тропосферу и даже стратосферу.

Аэрозоли попадают в атмосферу не только снизу, но и сверху. Мельчайшие частицы образуются при сгорании и испарении метеоритов, их размер менее 0,1 мкм. Некоторые специалисты считают, что количество метеорной пыли, поступающей в атмосферу, достигает 100 Мт в год. Существует мнение, что метеорная пыль может выполнять роль ядер конденсации.

А что же представляют собой антропогенные аэрозоли? Они разнообразны, поэтому будем говорить лишь о тех, которые, поступая в атмосферу, оказывают наибольшее воздействие на ее свойства.

Главный источник антропогенных аэрозолей — процесс горения. Горение — основа энергетики, поскольку большая часть электроэнергии производится тепловыми электростанциями; основа транспорта, поскольку источником энергии для транспортных средств является сжигание топлива в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания, в камерах сгорания реактивных двигателей. И даже транспорт на электрической тяге зависит от сжигания топлива, поскольку электроэнергию производят тепловые электростанции.

Аэрозоли, образующиеся в результате сжигания топлива, можно разделить на первичные и вторичные. Первичные образуются непосредственно в процессе горения: сажа и смолистые вещества, а также частицы летучей золы, т. е. негорючих минеральных примесей к топливу. В золе содержатся почти все элементы пе-

риодической таблицы. Вторичные аэрозоли образуются в результате конденсации продуктов химических реакций в атмосфере с участием не полностью сгоревшего топлива, окислов серы и азота.

Автомобильный транспорт генерирует аэрозоль двуокиси свинца, который образуется при сгорании этилированного бензина. Выход этого аэрозоля не велик по массе, но его частицы оказывают очень вредное действие на человеческий организм. В крупных городах количество свинцового аэрозоля, поступающего с выхлопными газами в атмосферу, может достигать сотен тонн ежедневно.

Энергетика и транспорт дают $\frac{2}{3}$ общего количества антропогенных аэрозолей. Среди прочих источников аэрозолей — металлургические предприятия, где аэрозоли образуются при обжиге руд, плавке металлов и состоят из окислов металлов, в том числе тяжелых, наиболее вредных для человека. Производство строительных материалов, в первую очередь цемента, сопровождается уносом мелких частиц минеральных веществ. Разнообразные аэрозоли могут образовываться в химических производствах. Вторичные аэрозоли получают в результате химических реакций газообразных углеводородов, поступающих в атмосферу, на объектах добычи, транспортировки, переработки нефти и газа. Основную массу антропогенных аэрозолей составляет сульфат аммония с примесью 10—30% сажи.

Количество антропогенных аэрозолей во много раз меньше естественных. Но выделяются они вблизи человеческих жилищ, поэтому оказывают влияние на условия жизни людей.

Холодает или теплеет на нашей планете? Климат нашей планеты определяется соотношением (радиационным балансом) между потоком энергии, приносимым излучением Солнца, и потоком, уходящим от планеты в

мировое пространство. Излучение Солнца имеет широкий диапазон длин волн — от рентгеновского до радиоволнового. Но для климата важно видимое и инфракрасное излучение. Максимум энергии в солнечном спектре приходится на видимую область, на зеленую часть спектра. Часть падающего на Землю потока лучистой энергии рассеивается в верхних слоях атмосферы и не доходит до земной поверхности. Часть отражается облаками, часть — поверхностью суши и океана. Кроме того, нагретая поверхность Земли испускает инфракрасное излучение с максимумом энергии в области длин волн 10 мкм. Атмосфера и облачность задерживают часть этого излучения, но большая часть, составляющая около $\frac{1}{7}$ потока солнечной энергии, уходит обратно в космос.

Атмосферные аэрозоли играли важную роль в радиационном балансе планеты, но все зависит от природы аэрозоля и от того, на какой высоте он находится.

Чистая атмосфера прозрачна в видимой области, но в инфракрасной части спектра есть и полосы поглощения, и окна прозрачности, через которые может уходить в космос излучение земной поверхности. Аэрозоли же хорошо рассеивают видимое и ближнее инфракрасное излучение, но их частицы слишком малы, чтобы рассеивать излучение земной поверхности. Однако аэрозольные частицы могут поглощать солнечное излучение и отдавать поглощенную энергию воздуху.

Рассеивающие аэрозоли в верхних слоях атмосферы увеличат альбедо планеты (отражательную способность) и будут усиливать охлаждение поверхности планеты. Поглощающие аэрозоли в стратосфере и в верхней тропосфере должны уменьшить альбедо, но захваченная ими энергия расходуется на нагрев этих слоев атмосферы и в конечном итоге переизлучается в космос. Поэтому их роль сводится к уменьшению потока тепла к поверхности. Поглощающие аэрозоли в ниж-

ней тропосфере способствуют разогреву приземного слоя воздуха. Но из нижней тропосферы аэрозольные частицы довольно быстро вымываются дождевыми каплями, поэтому накопления аэрозолей в нижней атмосфере не происходит. В верхней тропосфере и стратосфере срок пребывания аэрозольных частиц составляет не менее года. Это может привести к скапливанию аэрозолей и их влиянию на климат в направлении снижения температуры. Правда, по-видимому, снижения среднегодовой температуры не происходит, потому что влияние аэрозолей компенсируется накоплением в атмосфере двуокиси углерода, основного продукта сжигания топлива, хорошо поглощающего инфракрасное излучение Земли.

Наиболее убедительным свидетельством влияния аэрозолей на климат являются большие извержения вулканов. В 539 г. в Индонезии произошло извержение вулкана Рабаул. Мощность извержения можно оценить по количеству пыли, содержащейся в слоях льда ледников Гренландии или Антарктиды, образовавшихся в период, когда произошло извержение. Византийские хроники рассказывают, что после извержения в течение двух лет Солнце исчезало на высоте 36° над горизонтом. Мгла окутала Землю. В течение двух лет овощи не вызревали даже в Месопотамии. Судя по содержанию пыли в кернах гренландского льда, извержение вулкана Тамбора в той же Индонезии в 1814 г. было раза в два-два с половиной слабее извержения Рабаула. Но и этого было достаточно, чтобы 1815 год вошел в историю как «год без лета» или «тысяча восемьсот морозный». Южная граница снегопадов в том году доходила до 50° с. ш. В Европе погибло от четверти до трети урожаев зерновых и наступил великий голод. Относительно небольшие понижения температуры на срок несколько месяцев отмечались после извержения Кракатау в 1883 г., Катмая на Аляс-

ке в 1912 г., Эль Чичона в Мексике в 1981 г. Последнее извержение дало возможность детально изучить механизм воздействия вулканических аэрозолей на радиационный баланс планеты. Оказалось, что основное действие оказывает не первичный эруптивный (взрывной) аэрозоль, количество которого в стратосфере достигало несколько десятков Мт, а вторичный аэрозоль серной кислоты, образующийся в стратосфере через несколько недель в результате фотохимического превращения двуокиси серы в серную кислоту. Количество этого аэрозоля достигло 180 Мт и привело к снижению средней температуры в Северном полушарии на $0,8^\circ$.

С влиянием аэрозолей на климат планеты связаны две гипотезы. Одна касается прошлого — гибели динозавров, а другая — возможности выживания человечества после ядерной войны.

Загадка гибели динозавров волнует людей давно. Почему погибли эти могучие животные, почему остановилось развитие зародышей в уже отложенных яйцах динозавров? Большинство ученых сходятся на том, что причиной этого было внезапное сильное похолодание.

По мнению американских ученых — отца и сына Альваресов, разгадка скрыта не только в геологических слоях, хранящих кости динозавров, но и в космосе. Астрономы, наблюдавшие за движением последней известной планеты Солнечной системы — Плутона, — отметили возмущения орбиты, которые могут быть объяснены присутствием за орбитой Плутона невидимого в телескопы массивного черного тела. Предполагается, что это небольшая потухшая звезда, которую заочно окрестили Немезидой в честь древнегреческой богини возмездия. Звезда эта должна обращаться по эллиптической орбите, апогей которой удален от Солнца на 2 световых года, а перигелий лежит всего в половине светового года от Солнца, т. е. в густой части кометного

облака Оорта, окружающего Солнечную систему. Раз в 28 млн. лет Немезида проходит через перигелий, вызывая возмущение орбит некоторых комет, которые устремляются к Солнцу. Некоторые из них могут столкнуться и действительно сталкиваются с внутренними планетами. Безатмосферные небесные тела — Луна, Меркурий, спутники Юпитера — несут многочисленные кратеры — следы ударов астероидов и кометных ядер. На Земле геологические процессы и воздействие атмосферы сглаживают такие следы, но со спутников «шрамы» от ударов видны и на Земле. Некоторые ученые считают следами столкновения с кометами Гудзонов и Мексиканский заливы, Берингово море.

Что же должно произойти при столкновении кометы с поверхностью Земли? Конечно, будут землетрясения чудовищной силы, гигантские приливные волны. Но не это оказывается самым страшным для жизни на Земле — при столкновении в атмосферу будет выброшено огромное количество пыли, начнутся пожары лесов, извержения вулканов. Атмосфера станет непрозрачной для солнечного света, и наступит долгая зима. Эта гипотеза подтверждается нахождением сажи в соответствующих геологических слоях. Кроме того, вместе с сажой почему-то обнаружено повышенное содержание иридия, — может быть, ядро кометы или астероид содержали этот благородный металл.

Для резкого замутнения атмосферы аэрозолями, сопровождающегося понижением температуры у поверхности Земли на 5—10°, советский ученый М. И. Будыко предложил название «аэрозольная климатическая катастрофа». Предполагается, что такие катастрофы не раз могли происходить за минувшие геологические эпохи, что аэрозольной климатической катастрофе обязана своим началом эпоха великого оледенения.

Не исключено, что глобальную климатическую ка-

тастрофу могут вызвать и сами люди. Ядерная война привела бы не только к гибели сотен миллионов людей при ядерных взрывах и пожарах, к заражению огромных пространств радиоактивными продуктами, но и к уменьшению прозрачности атмосферы. Города, в которых сосредоточено огромное количество горючих материалов, неизбежно превратятся в гигантские костры. При пожаре одного города может образоваться до 200 кг дымовых частиц на жителя. Общее количество дыма, которое поступит в атмосферу в случае массовых пожаров ядерной войны, подсчитать трудно, поскольку выход дыма при горении может колебаться в широких пределах. Одновременно же поступление в атмосферу более 300 Мт дыма вызовет длительное снижение температуры в глобальном масштабе. В отдельных районах Северного полушария температура упадет на 50°. Напомним, что разница среднегодовой температуры между Москвой и Северным полюсом составляет около 20°. Изменится весь характер глобальной циркуляции атмосферы, изменят свои направления океанские течения. Поэтому даже после удаления аэрозолей из атмосферы, на что потребуется около двух лет, прежний климат не восстановится. Если же количество дыма составит 50—300 Мт, то понижение температуры охватит не весь земной шар и последствия его будут обратимыми, но размер их будет зависеть от оптических характеристик дыма, от начальной высоты подъема дыма над районами пожаров. Роль начальной высоты подъема очень велика — ведь из нижней тропосферы аэрозольные частицы «вымываются» в течение месяца, из верхней тропосферы удаление частиц протекает значительно медленнее и может стать очень медленным, если аэрозоль будет обладать поглощающими свойствами. Тогда произойдет разогрев верхней тропосферы и прекратится обмен воздухом с нижней тропосферой. Очень медленно удаляются частицы из стратосферы, куда они

могут быть занесены огненными смерчами.

Резкое понижение температуры в результате массовых пожаров ядерной войны получило название «ядерная зима». Над районами пожаров дым будет настолько густым, что наступит полная темнота — «ядерная ночь». Похожее явление наблюдалось в сентябре 1938 г. в Ямало-Ненецком национальном округе в полосе шириной 250 и длиной до 600 км. Мгла спустилась на землю утром и продолжалась несколько часов, было значительно темнее, чем ночью. Причиной внезапного затемнения явилась огромная туча дыма, образовавшаяся при пожаре лесов на Северном Урале. После ядерной войны ночь может оказаться настолько темной и долгой, что прекратится фотосинтез, погибнут растения, а следовательно, и вся жизнь на Земле.

Как мы видели, оптика атмосферы определяется в основном присутствием в воздухе аэрозольных частиц. Значение ее для человека не ограничивается гипотетическими аэрозольными катастрофами и даже возможным похолоданием из-за загрязнения атмосферы. Прозрачность атмосферы сильно влияет на работу транспорта, особенно воздушного. Она определяет возможности спутниковых наблюдений, астрономических исследований, работу лазерных систем связи. Поэтому большое значение в наше время приобрела разработка методов прогноза «оптической погоды» — состояния прозрачности атмосферы, определяемого переносом чистых и загрязненных воздушных масс, изменениями влажности, ведущим к конденсации паров воды на атмосферных ядрах с образованием дымки. Вблизи городов прозрачность атмосферы может резко уменьшаться из-за образования фотохимического смога.

Безумие пахаря и гроздь гнева. Значительная часть посевов зерновых культур в умеренных поясах нашей

планеты расположена в так называемых зонах рискованного земледелия. В этих районах количества осадков, составляющих среднюю многолетнюю норму выпадения, недостаточно, чтобы обеспечить получение урожая, особенно если принимать меры по сохранению влаги в почве. Но случаются засушливые годы, когда осадков выпадает вдвое-втрое меньше. Иногда засухи повторяются три-четыре года подряд. В такие годы поверхностный слой распаханного поля пересыхает на глубину десятков сантиметров, становится рассыпчатым, пылит. Даже небольшой ветер подхватывает частицы почвы, несет их облаком пылевого аэрозоля.

В зонах рискованного земледелия, особенно на больших равнинах, нельзя при вспашке переворачивать пласт земли, нельзя проводить плугами борозды вдоль направления преобладающих ветров, нельзя сеять из года в год на одном месте зерновые культуры — это все способствует эрозии почвы, возникновению пыльных бурь. С этим явлением пришлось столкнуться и отечественным агрономам. После освоения в середине 50-х гг. целинных земель на просторах Казахстана огромные пространства из года в год засеивались пшеницей, причем использовались приемы вспашки, принятые в европейской части страны, где осадков больше, а поля чередуются с лесами. Это привело к эрозии почвы, пыльным бурям. Только после этого были выработаны новые средства вспашки и культивации земли, созданы новые машины для безотвальной вспашки. Ветровая эрозия была остановлена.

Пыльные бури возникают не только вследствие неправильной обработки земли. Они случаются над пустынями (в том числе на Марсе, где замутнение атмосферы пылью вызывает резкое снижение температуры поверхности), но могут быть порождены и неумелым вмешательством человека в существующие природные системы.

Пыльные бури не всегда наносят вред земледелию. Иногда ветры приносят с собой аэрозоль, частицы которого, осаждаясь на грунт, улучшают плодородие полей. В Китае, Аргентине, советской Средней Азии есть мощные, достигающие иногда толщины сотен метров отложения лёсса или желтозема. Лёсс — это пыль, образующаяся при выветривании горных пород, при ветровом уносе мельчайших частиц грунта пустынь. Эта пыль содержит не только минеральные, но и органические вещества. Там, где оседает эта пыль, образуются слои плодородной почвы. Некоторые почвоведы считают, что черноземы Украины, юга России и Сибири образовались при смешении осадков лёсса с перегноем. Ветер выдувает лессовый аэрозоль из мест его отложения, переносит в сельскохозяйственные районы. Именно осадкам этих частиц обязаны своим плодородием поля Узбекистана, северо-западного Китая.

Аэрозоли на службе человека

Спрей — жидкая пыль. Значительная часть твердого топлива и подавляющее большинство жидкого сжигаются в виде аэрозолей. Появляется возможность использовать в распыленном виде такие виды топлива, которые иначе просто не горят, — угольную пыль, торфяную крошку. Горению слоя пылевидного топлива препятствует образование слоя золы на поверхности, а также низкая теплопроводность пыли, затрудняющая прогрев нижних слоев до температуры воспламенения.

Распыление пылевидного топлива не представляет серьезной технической проблемы — ведь при этом не нужно затрачивать работу на разрушение твердого тела, а только на разрыв адгезионных сил (сил межмолекулярного притяжения) между пылинками. Достаточно сыпать пыль из трясущегося бункера или по-

давать шнеком (винтовым конвейером) в сильную струю воздуха — и пыль перейдет в аэрозольное состояние. Иное дело жидкости. Раздробление жидкости на капельки для создания поверхности — дело нелегкое. Если мы прикладываем механическое усилие к жидкости, мы не только распыляем ее, но и заставляем двигаться как целое. Причем чем меньше капелька, тем меньше она будет подвержена разрушению. Поэтому приложение механической энергии к жидкости после определенного предела перестает давать результаты, и чисто механическими средствами получить капельки размером менее 5 мкм не удастся.

Что дает тонкий распыл жидкостей? При сжигании топлива распыление позволяет увеличить поверхность горения, скорость испарения капель и перевести горение в паровую фазу. Это увеличивает энерговыделение в объеме, температуру горения, степень сгорания топлива. Таким образом, уменьшается размер топок в котельных, увеличивается мощность тепловых двигателей при сохранении постоянного размера цилиндров и камер сгорания. Поэтому наибольшее внимание совершенствованию методов распыла уделялось при развитии энергетики и транспорта.

В бензиновых двигателях внутреннего сгорания распыление происходит в карбюраторе с целью создания паровоздушной смеси, сгорающей в цилиндре. В дизеле топливо впрыскивается в виде жидкой струйки непосредственно в цилиндр в конце цикла сжатия. Топливо должно сгореть за доли миллисекунды, поэтому его дробят на мельчайшие капельки и подают под очень высоким давлением — до 20 МПа ($\approx 2 \times 10^4$ атм).

Жидкую пыль, получаемую в результате распыления, называют «спрей». Особенность спреев — полидисперсность, т. е. присутствие в них капелек различных параметров. Для получения тонкого распыла при-



меняют форсунки различной конструкции. В одних струя или пленка жидкости засасывается разрежением, создаваемым высокоскоростным потоком воздуха, и этим же потоком дробится на капельки. Такой способ распыла называется пневматическим, им распыляется бензин в карбюраторе. В механических форсунках тонкая струйка жидкости выбрасывается под большим давлением, и за счет трения жидкости о воздух создается неустойчивость струи, распад ее на капли. Иногда струю жидкости закручивают с помощью центробежных форсунок, они используются, например, в камерах сгорания реактивных двигателей. В струйных мельницах тонкий спрей получается при ударе струйки под высоким давлением о твердую поверхность или о встречную струйку.

Распыление жидкостей, суспензий, эмульсий широко используется в народном хозяйстве, например при получении сухого молока, порошкообразных красителей, некоторых видов удобрений и многих других продуктов. Распыленной водой тушат нефтяные пожары. В виде спрея удобно подводить смазку к режущему инструменту при обработке металлов.

Около 20% мирового урожая зерновых культур уничтожают вредители. Для борьбы с ними используют аэрозоли, получаемые распылением ядовитых веществ — инсектицидов (растворенных в воде или в испаряющихся нефтепродуктах). При высыхании капелек спрея образуются частицы инсектицида. Раньше ядохимикатами покрывали всю поверхность листьев растений. Но при таком способе очень велик расход инсектицида. Он накапливался в почве, усваивался растениями и в конечном итоге попадал в организм человека. Бесконтрольное, необдуманное применение такого инсектицида, как ДДТ, привело к тому, что в почвах и океанской воде накопилась довольно высокая его концентрация. ДДТ скапливается в жировых тканях

животных и оказывает вредное влияние на обмен веществ. Даже в тканях антарктических пингвинов был обнаружен ДДТ. Впоследствии ученые синтезировали новые инсектофунгициды, они быстро разрушаются и не накапливаются в почве. Для уменьшения вредного воздействия инсектицидов на человека ученые придумали эффективный способ распыления аэрозолей. Оказалось, что насекомое можно убить прямым осаждением капельки ядовитого тумана на его тело. При аэродинамическом обтекании аэрозольные частицы под действием сил инерции отклоняются от линий тока и задевают тело вредителя. Продувкой насекомых в аэродинамических трубах установили, при каком размере частиц спрея обеспечивается и достаточно высокая эффективность осаднения частиц на насекомых, и поражение вредителя одной каплей. На этом принципе основано ультрамалообъемное опрыскивание растений, позволившее снизить расход ядохимикатов в десятки и сотни раз, повысить равномерность обработки поля. Для равномерного опрыскивания очень важно знать законы распространения аэрозолей в турбулентной атмосфере.

В животноводстве аэрозоли помогают и лечить животных, и предупреждать распространение болезней, причем введение лекарственных препаратов в легкие в виде аэрозолей позволяет проводить массовую обработку животных. Чтобы аэрозольная частица попала на слизистую оболочку бронхов животного, она не должна превышать 2 мкм. Получают такой тонкий аэрозоль с помощью ультразвука. Осаждаются мелкие частицы в легких в основном за счет диффузии или броуновского движения.

В медицине спреи используются как средство дезинфекции. Лечебным действием обладают не только искусственные аэрозоли, получаемые распылением жидкостей, но и некоторые естественные. Так, больным бронхиальной астмой очень полезно пребывание в пе-

щерах. Считается, что благотворное воздействие пещерной атмосферы обусловлено спелеоаэрозолем — частицами раствора извести и солей, которые образуются при разбрызгивании капель, падающих со сводов пещер и с известковых «сосулек» — сталактитов.

Широкое применение и в народном хозяйстве, и в быту получили аэрозольные баллончики. С их помощью распыляют краски, смазки, инсектициды, различную парфюмерную продукцию. Аэрозольный баллончик — портативный малогабаритный генератор спрея (см. рис. на с. 33). Он представляет собой тонкостенный металлический цилиндр с сифонной трубкой, на конце которой находится клапан, а за ним — распылительная форсунка. Баллончик заливается жидкостью не полностью, над ней остается пространство, заполняемое распыляющим газом — пропеллентом. При открытии клапана сжатый газ выдавливает и распыляет жидкость. Газ-пропеллент должен растворяться в жидкости — тогда газовыделение при сбросе давления способствует более тонкому распылу жидкости; этому же способствует и вскипание жидкости при выбросе в атмосферу с более низким давлением.

В качестве пропеллентов чаще всего используют хладагенты — фреоны, по химической природе представляющие собой фторхлоруглероды. Они химически

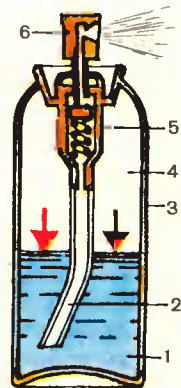


Схема аэрозольного баллона:

- 1 — подлежащий распылению химикат в смеси с пропеллентом,
- 2 — насыщенные пары пропеллента,
- 3 — корпус,
- 4 — сифонная трубка,
- 5 — чашечка клапана,
- 6 — распыляющая головка.

инертны, нетоксичны, сжижаются под небольшим давлением, растворяются во многих органических жидкостях. Способность сжижаться или растворяться в основной жидкости обеспечивает постоянство давления пропеллента при опорожнении баллончика.

Химическая инертность фреонов, в обычных условиях обеспечивающая отсутствие токсического и коррозионного действия, могла обернуться большой бедой для человечества. Дело в том, что в тропосфере фреоны разрушаются очень медленно — примерно наполовину за месяц. За такой период они успевают проникнуть из тропосферы в стратосферу и под действием ультрафиолетового излучения вступают в фотохимические реакции, ведущие к образованию радикалов, катализирующих разрушение озона. На земном шаре ежегодно из аэрозольных баллончиков выбрасывается порядка 10 000 т фреонов, что ведет к постепенному уменьшению мощности озонового слоя в стратосфере. А это означает возрастание уровня ультрафиолетовой радиации у поверхности. Радиация влечет за собой возрастание уровня заболевания раком кожи, снижение урожайности сельскохозяйственных культур и др.

Ученые вовремя распознали опасность. Они нашли типы фреонов, не дающие при фотохимических реакциях катализаторов разрушения озона.

Химическая инертность фреонов все же недостаточна при распылении водных растворов и суспензий. В контакте с водой фреоны медленно вступают с ней в реакцию, давая высокотоксичную фтористоводородную кислоту. Поэтому для распыления водосодержащих продуктов используют пропан, углекислый газ, азот. Но при этом спрей получается грубодисперсным (состоящим из крупных капель).

Ультрадисперсные системы — технология будущего.

Что же такое аэрозоль? Это такие частицы, которые могут переноситься с воздухом на большие расстояния, оставаться во взвешенном состоянии длительное время. В турбулентном воздухе, например при бурях и ураганах, могут находиться в аэрозольном состоянии частицы размером сотни микрон. При умеренном ветре в приземном слое на расстояние более километра переносятся частицы мельче 20—30 мкм. В закрытом помещении через несколько часов осядут на пол пылинки крупнее 5 мкм. Аэрозольные частицы небольших размеров следует отличать от газовых и паровых молекул. Тем более что в парах и газах могут находиться не только одиночные молекулы, но и ассоциаты из двух, трех и более молекул. Молекулярные агрегаты, в которых молекулы удерживаются вместе силами межмолекулярного притяжения, называются кластерами. Можно ли считать взвешенный в воздухе кластер из десяти молекул аэрозольной частицей? Установившейся терминологии применительно к этому случаю нет. От газовых молекул аэрозольные частицы отличаются характером их взаимодействия с поверхностью. Газовые молекулы отскакивают от стенок, аэрозольные частицы всегда прилипают и удерживаются молекулярными силами. Молекулярный кластер в зависимости от своей природы может и отскочить от стенки, и прилипнуть, и разрушиться, прилипающий кластер неотличим от аэрозольных частиц. Другой признак аэрозольных частиц — их термодинамическая стабильность. Они испаряются только при повышении температуры, понижении давления паров. Кластеры же могут быть стабильны, как, например, кластеры молекул металлов или углерода при обычных температурах. Но в недосыщенных парах возникают на ничтожные доли секунды и снова распадаются кластеры, которые стабильными никак не назовешь и не причи-

слишь к аэрозольным частицам. Конечно, термодинамическая стабильность — понятие относительное. Она зависит от внешних условий. Кроме того, аэрозольные частицы всегда термодинамически нестабильны в отношении коагуляции (объединение при столкновениях), поскольку она уменьшает удельную поверхность частиц и поверхностную энергию системы. Но неиспаряемость частиц при постоянных условиях и обязательное прилипание к стенкам при столкновениях можно принять в качестве нижней границы размеров аэрозольных частиц. Этому условию отвечает при обычной температуре размер кластеров металлов, их окислов, солей из нескольких молекул или десятка молекул.

Как же получить столь малые частицы? Ведь даже специальные методы распыления не дают частиц размером менее десятых долей мкм. Получить мельчайшие кластеры можно конденсацией пара. Для образования конденсационных аэрозолей в чистом паре необходимо пересыщение больше критического. Чем больше пересыщение, тем больше рождается кластеров. А это значит, что масса пара будет поделена между большим количеством частиц, а сами частицы окажутся меньше.

Пересыщение можно сделать настолько большим, что даже самому маленькому кластеру — всего из двух молекул (димеру) — будет термодинамически невыгодно распадаться. В этом случае кластеры будут только расти по схеме: мономер+димер=тример, димер+димер=тетрамер, тример+димер=пентамер и т. д. Что же, в этом случае можно получить вещество, состоящее из совсем малых кластеров? Нет, если мы осадим все эти димеры, тримеры, тетрамеры на поверхность, они сольются в сплошную пленку.

В начале века русский ученый М. А. Павлов установил, что температура плавления — величина непо-

стоянная. Она зависит от размера частиц вещества: чем меньше частица, тем при меньших температурах она плавится. Правда, уменьшение температуры плавления становится заметным лишь для достаточно малых частиц — при тех же размерах, когда начинает расти давление пара над частицами. Но частицы, состоящие из сотни атомов, могут сливаться при контакте с другой частицей. При этом они ведут себя двояко — могут обладать структурой твердого кристалла, но это не мешает им сливаться с другим кристаллом, как сливаются в одно целое капельки жидкости.

Итак, для уменьшения размера частиц, получаемых конденсацией, надо увеличивать пересыщение пара, что достигается быстрым охлаждением — «закалкой». Но беспредельного увеличения дисперсности частиц таким образом добиться нельзя — предел уменьшения размеров дает коагуляция, сопровождающаяся укрупнением частиц. Лишь достаточно большие частицы — размером более 20—30 ангстрем (2—3 нм), коагулируя при комнатной температуре, могут образовать агрегат, в котором каждая частица сохранит свою индивидуальность, свою структуру и свойства. А свойства эти стоит сохранять ввиду их необычности.

Частицы размером менее 0,1 мкм называют ультрадисперсными. Основная их особенность — очень развитая поверхность, более $5 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$. Благодаря этому такие частицы быстро испаряются и горят. Многие металлы в ультрадисперсном состоянии самовоспламеняются. Способность металлических частиц малого размера к быстрому сгоранию используется для получения ракетных топлив. Ультрадисперсные частицы применяют в качестве пигментов для получения лаков и красок, дающих равномерные покрытия, фотографических эмульсий, сочетающих высокую чувствительность с высокой разрешающей способностью и насыщенностью цветопередачи. Еще более мелкие части-

цы (менее 0,02 мкм) обнаруживают поистине аномальные свойства. Из-за малого размера меняются постоянные кристаллической решетки вещества, из которого состоит частица. Это влечет за собой изменение электронной структуры, оптических свойств, химической активности. В результате такие частицы можно использовать как катализаторы с необычно высокой активностью, если сумеешь защитить их от слияния друг с другом при повышенных температурах.

Наиболее важная область применения ультрадисперсных частиц — получение сплавов и новых композиционных материалов с совершенно необычными механическими, оптическими и электрическими свойствами.

Твердая дисперсная система, в которой одна дисперсная фаза (наполнитель) распределена в сплошной матрице или же перемешаны две дисперсные фазы, называется композиционным материалом. Используя в качестве наполнителя ультрадисперсные частицы, можно получать такие удивительные материалы, как сверхпроводники, сохраняющие сверхпроводимость при относительно высоких температурах.

Возможно, в будущем люди научатся получать ультрадисперсные частицы в аэрозольном состоянии, каждая из которых будет представлять собой транзистор или даже микросхему. Из них можно будет строить суперультраминиатюрные компьютеры, обладающие большей способностью к переработке информации, чем живой мозг.

Для извлечения цветных металлов из руд используют процесс фьюмингования, при котором сульфиды металлов выделяются в виде высокодисперсного аэрозоля — фьюма. Затем его осаждают, полученный продукт обжигают, восстанавливают, переплавляют. Здесь аэрозоль служит лишь формой извлечения металла из руды.

Конденсацией получают инсектицидные или фунги-

цидные аэрозоли, если соответствующий препарат может возгоняться, не разлагаясь. Такие инсектофунгисициды примешивают к пиротехническим составам дымовых шашек. Шашка содержит окислитель и топливо, при реакции между которыми выделяется тепло, необходимое для возгонки препарата. При конденсации образуется довольно высокодисперсный аэрозоль с размером частиц порядка десятых долей мкм. В открытом пространстве такой аэрозоль применять нет смысла — его унесет ветром, а эффективность уничтожения вредных насекомых окажется слишком малой. Чем меньше частицы, тем меньше они осаждаются под действием инерционных сил при обтекании препятствий. В закрытом же помещении аэрозоль может находиться долгое время. Он будет осаждаться главным образом за счет броуновской диффузии. А это значит, что он будет осаждаться на стенах, потолке, в различных щелях.

Дождь по заказу. Для образования осадков из переохлажденных облаков необходимо присутствие достаточного количества ледяных ядер. Значит, если в облако ввести искусственно частицы, которые могут служить ледяными ядрами, то пойдет дождь? Да, если облако достаточно мощное и сильно переохлажденное. Проще всего вызвать осадки введением в облако частиц твердой углекислоты сухого льда. Они имеют температуру -65°C и могут вызвать замерзание даже переохлажденных капелек. Кроме того, в процессе испарения частиц углекислоты на ней самой будут формироваться ледяные кристаллы в виде иголочек или снежинок. Дробление этих кристаллов приведет к образованию большого количества ледяных частиц. Но расход углекислоты оказывается слишком большим.

Большой эффективностью обладают аэрозольные частицы иодистого серебра, которые вызывают замер-

зание водяных капелек при -4°C , и иодистого свинца, эффективного ниже -11°C , в то время как чистая вода замерзает при переохлаждении до -40°C . Из 1 г этих веществ получается до 10^{15} зародышей ледяных частиц, а расход вещества на «засев» большого кучевого облака составляет около килограмма. Оба этих вещества сравнительно легко возгоняются, а потом конденсируются, образуя частицы нужного размера. Возгонку веществ можно произвести, подмешав их в горючие пиротехнические составы. А пиротехническими составами можно снаряжать артиллерийские снаряды или ракеты и обстрелять ими подходящее облако.

Но и с помощью этих реагентов искусственные дожди для увлажнения полей не устраивают. Ведь когда наступает засуха, облаков над полями просто не бывает. А если бы даже появились? Ведь засуха охватывает миллионы гектаров пашни. Даже таких высокоэффективных реагентов в этом случае потребуется слишком много. Поэтому используют «засев» или активные воздействия на облака не для вызывания дождя, а для предупреждения града.

Градобития могут причинять очень большой ущерб посевам, плантациям фруктовых деревьев, особенно винограду. Площадь, занимаемая этими культурами, относительно невелика. Но именно в зонах виноградарства особенно часто бывают градобития. Виноград сажают в горных долинах. В чистом горном воздухе мало естественных ледяных ядер. Поэтому замерзшие капельки вырастают до очень большого размера, не успевают растаять и выпадают на землю градом — размером с лесной орех, иногда в грецкий, реже в куриное яйцо. Если увеличить количество ледяных ядер, водяной запас облака окажется поделен между многими растущими частицами, они будут маленькими, растут и выпадают на землю дождем.

Иодиды свинца и серебра добавляют в пиротех-

нические составы, которыми снаряжают специальные ракеты или снаряды для зенитных орудий. В районах виноградарства существуют специальные противоголадовые службы, оснащенные пушками, пусковыми установками противоголадовых ракет, метеорологическими локаторами. Мелкие облачные капли практически не отражают радиолокационное излучение — рассеяние радиоволн на них подчиняется закону Рэлея, согласно которому интенсивность отраженного сигнала пропорциональна четвертой степени отношения размера частиц к длине волны. Для облачных капелек четвертая степень этого отношения составит 10^{-16} — 10^{-20} , и сигнал будет слишком слаб. Но стоит в облаке образоваться крупным частицам, скажем миллиметровым, как локатор сразу уловит радиоэхо и выдаст координаты опасной зоне. Тогда и производится «засев».

Применение иодидов имеет большое преимущество перед углекислотой — ведь ими можно снаряжать ракеты и снаряды, которые могут храниться долгое время, а углекислота все время испаряется. Углекислоту поэтому можно вносить в облака только с самолетов, а это опасно: в облаках возникает электризация, молниевые разряды, мощные конвективные потоки могут опрокинуть самолет в штопор.

Все же углекислота применяется для вызывания осадков зимой. Это делается для того, чтобы уменьшить расходы на уборку и вывоз снега с городских улиц. В Москве, например, имеется отряд самолетов для активных воздействий на снежные облака. Эти самолеты могут также обеспечить хорошую погоду в праздничный день. Облака можно не подпустить к городу, а если облака не очень мощные — рассеять их. В этом случае замерзшие капельки унесут воду из облаков и они испарятся, а сами капельки тоже испарятся, не долетев до земли.

В дни ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС искусственное вызывание осадков использовалось для того, чтобы не допустить дождевые облака в зону радиоактивного заражения. Дожди могли смыть радиоактивные вещества в реки, которые не сразу успели защитить дамбами. Дождевая вода могла просочиться в подземные водоносные горизонты и по ним проникнуть в водоемы. Для искусственных воздействий на осадки созданы специальные ракеты. Но серебра мало и оно дорого, а свинец с дождевой водой возвращается на землю, накапливается в почве, усваивается растениями, попадает в пищу. Уже используются для этой цели ацетилацетонат меди и флороглюцин. Поиски новых реагентов продолжаются.

Аэрозоли-враги

Легкие не выносят пыли. Способность частиц осаждаться в альвеолах легких чревата для человека тяжелыми заболеваниями — пневмокониозами. Очень многие вещества, окружающие нас в повседневной жизни и абсолютно безвредные в виде крупных твердых тел, становятся смертельно опасными в аэрозольном состоянии. Частицы горных пород, цементной пыли, угля, асбеста, пылинки, образующиеся при переработке хлопка, льна, сахарного тростника, способны причинить тяжелый, непоправимый ущерб здоровью человека.

После того как частица осела на стенки альвеолы, ее растворимая часть всасывается в кровь и, если вещество токсично, оказывает вредное воздействие на организм. Но и нерастворимые частицы нетоксичных веществ также оказывают вредное действие. Человек может многие годы вдыхать пыль и ничего не чувствовать, а она будет постепенно накапливаться в альвеолах, растягивать их, сдавливать мельчайшие кровеносные сосуды, которые при дыхании должны



насыщаться кислородом. Может пройти 10—12 лет, прежде чем проявится разрушительное действие пыли. Расширение альвеол ведет в конечном итоге к утрате дыхательной функции, к снижению жизненной емкости легких. Человек дышит, а кислород не усваивается, не насыщает кровь. Появляются боли в груди, одышка, нижняя часть грудной клетки выпячивается, больной часто кашляет.

Лечить пневмокониозы (силикоз, антракоз, асбестоз и т. д.) очень трудно. Поэтому главное — предупреждение заболевания, защита органов дыхания от пыли. Трудовое законодательство устанавливает жесткие пределы допустимого содержания (концентрации) пыли в воздухе — ПДК. Если обеспечивается ПДК, то заболевания не угрожают человеку. Если ПДК превышает, необходимо применять защитные средства. Особенно низкие ПДК установлены для веществ, частицы которых представляют собой тончайшие жесткие волокна, например для асбестовой пыли. Такие аэрозоли способны вызвать рак легких.

Пыли, вызывающие пневмокониозы, — это аэрозоли, образующиеся при разрушении твердых тел. Опасны для здоровья человека и конденсационные аэрозоли с твердыми частицами (дымы), образующиеся в различных производствах. Особенно много вредных аэрозолей образуется в металлургии, при обработке сыпучих руд высокой температурой для спекания в комочки нужного размера, при фьюминговании, при разливе металлов. Аэрозоли окислов металлов, причем высокодисперсные, способные проникать в легкие и осаждаться там, образуются при резке и сварке металлов. Вредность этих частиц отягощается токсическим действием соединений тяжелых металлов, которые могут свертывать белок — основу жизни. В последнее время получены данные, что кластеры металлов, подобно вирусам, способны проникать внутрь клеток через межкле-

точные мембраны и оказывать искажающее действие на жизнедеятельность клеток.

Ученые и врачи во многих странах работают над средствами защиты людей от вредоносного действия аэрозолей. Как расценить поведение людей, которые добровольно, без всякой производственной необходимости вдыхают концентрированный аэрозоль, содержащий многие токсичные вещества? Речь идет о табачном дыме, который правильнее было бы назвать табачным туманом, поскольку дымами называются конденсационные аэрозоли, состоящие из твердых частиц, а табачный аэрозоль состоит из капелек жидких продуктов сухой перегонки табака. Размер частиц табачного аэрозоля оптимален для глубокого проникновения в легкие и осаждения в альвеолах. Концентрация никотина, канцерогенного вещества — бензопирена, радиоактивного элемента — полония в табачном дыме в десятки раз превышает ПДК. Конечно, вред от курения уменьшается при курении сигарет с фильтрами, но по-настоящему безопасно курение только через противогаз. Борьба с курением имеет не меньшее значение, чем улавливание выбросов аэрозолей в атмосферу, создание индивидуальных средств защиты легких, подавление пыления в шахтах и при переработке сыпучих продуктов.

В середине XX столетия человечество вступило в атомную эру. Технология производства ядерного горючего, развитие атомной энергетики породили новую страшную опасность — радиоактивные аэрозоли. Обычная пыль должна годами скапливаться в легких, прежде чем проявится ее вредное действие. А одна крохотная, но содержащая достаточное количество радиоактивного изотопа пылинка способна привести к гибели человека. Ко времени появления атомной технологии люди уже осознали опасность, которую представляют радиоактивные аэрозоли, и смогли вовремя поставить

на ее пути надежные заслоны.

Радиоактивные аэрозоли могут образовываться такими же путями, что и обычные. Например, при распылении растворов и высыхании капелек растворов радиоактивных веществ, при добыче и обработке руд радиоактивных элементов, при выплавке радиоактивных металлов, при их термической и механической обработке. Но есть и специфичные для высокорadioактивных веществ механизмы образования аэрозолей. Некоторые радиоактивные элементы, например иод, полоний, плутоний, обладают заметной летучестью. Попавшие в атмосферу атомы и молекулы этих элементов или их соединений захватываются аэрозольными частицами, превращая их в радиоактивные. В этом случае аэрозольные частицы служат переносчиками радиоактивных веществ.

Разработаны надежные средства предупреждения образования и улавливания радиоактивных аэрозолей, если они образуются в технологических потоках, в закрытых помещениях. Но беда, если радиоактивный аэрозоль вырвется в атмосферу.

О необходимости строго соблюдать все меры предосторожности при работе с радиоактивными элементами человечеству напомнила авария на Чернобыльской атомной электростанции в апреле 1986 г., когда произошел выброс значительного количества радиоактивных аэрозолей.

Смог и кислые дожди. Вредные аэрозоли угрожают здоровью людей не только в цехах, шахтах, котельных. Выше допустимых пределов оказывается загрязненным воздух городских улиц, если не соблюдаются меры по предупреждению выбросов аэрозолей в атмосферу и существуют неблагоприятные погодные условия. В зимнее время, во время отопительного сезона, сжигается значительное количество топлива. В резуль-

тате в атмосферу попадают дополнительно частицы золы, сажи, а также окиси углерода, триоксида серы, оксидов азота, органических соединений, образующихся при неполном сгорании топлива. Загрязнение больше, если нет очистных сооружений или они плохо работают. Помимо этого, для состояния атмосферы имеет большое значение ее рассеивающая способность, зависящая от метеорологических условий. Если город хорошо продувается ветрами, в атмосфере создаются условия для быстрого разбавления и выноса загрязнений. Но если подолгу держится штиль, т. е. на некоторой высоте над землей образуется слой теплого воздуха (состояние инверсии), препятствующий подъему теплых струй дыма, то загрязнения скапливаются в приземном слое. Этому также способствует наличие мелких котельных с низкими трубами, выбрасывающих продукты сгорания на небольшую высоту. Обычно это котельные старой постройки, не имеющие устройств для улавливания вредных выбросов. В отходящих газах котельных содержится и водяной пар. Конденсация пара в грязном воздухе способствует образованию смога. Иногда это приводит к человеческим жертвам. В 1930 г. густой смог на четверо суток окутал долину реки Маас в Бельгии. В результате в окружающих районах погибло около 60 человек. В 1948 г. 20 человек умерло и несколько тысяч людей тяжело заболело во время смога в городе Донора в штате Пенсильвания, США. Наиболее ужасные последствия вызвал смог 5—8 декабря 1952 г. в Лондоне, где около 4000 человек умерло за эти четыре дня.

Предполагается, что наибольший вред во время смога приносят капельки серной кислоты, образующиеся при окислении диоксида серы, растворенного в капельках тумана, под каталитическим действием аэрозольных частиц, содержащих частицы тяжелых металлов.

Количество серной кислоты в смоге может в несколь-

ко раз превышать предельно допустимое, установленное для атмосферы цехов химических производств с шестичасовым рабочим днем.

Для предупреждения смогов мелкие котельные заменяются большими, снабженными высокими дымовыми трубами и улавливающими установками. Дымное угольное топливо в больших городах заменяется на газ или нефть, совершенствуются системы топок для обеспечения меньшего образования окислов азота при горении.

Обычный смог имеет вид густого тумана и бывает обычно в холодное время года. Но в конце 40-х гг. в Лос-Анджелесе жители столкнулись с новой, летней разновидностью смога, при которой видимость может сохраняться значительной — сотни метров и километры. Летний смог называют фотохимическим, поскольку образование его связано с протеканием под воздействием солнечного излучения фотохимических реакций, в результате которых образуются конденсирующие вещества — аэрозольные и другие продукты, остающиеся в газовой и паровой фазах. Среди них — озон и пероксиацетонитрил, раздражающе действующие на слизистые оболочки и дыхательные пути. Образование фотохимического смога связано не только со значительными выбросами выхлопных газов автомобилей, содержащих окислы азота и продукты неполного сгорания бензина, но также с малой рассеивающей способностью атмосферы и высокими интенсивностью и длительностью солнечного освещения. В городах, расположенных севернее 52-й параллели, смог обычно наблюдается в безветренные дни лишь по исчезновении Солнца на закате на значительной угловой высоте над горизонтом.

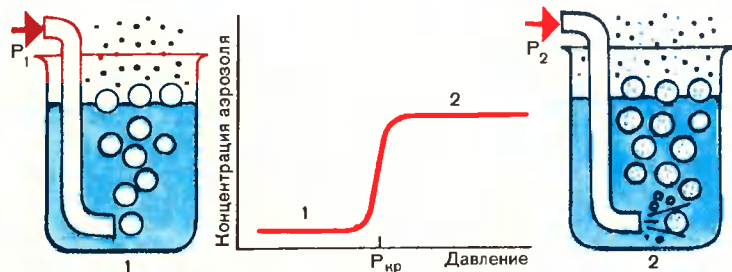
Для того чтобы ослабить фотохимический смог, необходимо конструировать автомобильные двигатели, обеспечивающие более высокую степень сжатия горю-

чей смеси в цилиндрах и более полное сгорание топлива; нужны запреты на невыключение двигателей перед светофорами — на холостом ходу сгорание топлива особенно низко. В дальнейшем предполагается, что удастся создать экономичные электромобили или двигатели, работающие на водороде. Но следует помнить, что аккумулятор электромобиля заряжается от сети, ток в которую поступает в основном от тепловых электростанций. Поэтому создание электромобилей не означает ликвидации выбросов в атмосферу, а лишь их удаление с городских улиц в район расположения электростанций.

Аэрозоли угрожают не только людям. А кому еще? — Животным, птицам, растениям, даже бактериям. Но не только живым существам, но и машинам, механизмам, полупроводниковым приборам, качеству чистых материалов.

Даже незначительная примесь постороннего вещества может изменить качество особо чистого химического продукта. А перенос загрязнений в виде аэрозолей — очень вероятный путь порчи продукта. Поэтому при получении очень чистых веществ приходится принимать тщательные меры по улавливанию частиц. Особенно много вреда могут принести аэрозольные загрязнения самым современным точным отраслям технологии.

Современные электронные приборы, которые используются для самых различных целей в вычислительной технике, в системах управления ракетами, самолетами, кораблями, промышленными роботами, в радио- и телевизионной аппаратуре, содержат интегральные схемы — крохотные полупроводниковые изделия, которые заменяют блок из сотен или даже тысяч электронных ламп или транзисторов с сопротивлениями, конденсаторами, индукционными катушками.



Количество аэрозолей, выделяющихся при технологических операциях, может изменяться в очень широких масштабах в зависимости от схемы организации процесса. Например, интенсивным источником аэрозолей, в частности радиоактивных, применительно к радиохимическим производствам является барботаж. Если барботируемый газ поступает под небольшим давлением, то аэрозольные частицы образуются только за

счет разрыва оболочек пузырьков на поверхности (1). При большом давлении пузырь заполняется аэрозолем в момент своего образования вследствие захвата брызг раствора. В этом случае количество образующегося аэрозоля резко возрастает (2). Существует пороговое давление $P_{кр}$, при котором включается этот механизм образования частиц. Правильно выбирая давление барботируемого газа, можно уменьшить образование аэрозоля.

Изготавливаются интегральные схемы из высокочистых полупроводниковых материалов, в которые вносят строго дозированные порции легирующих добавок, причем и места внесения этих добавок определены очень строго. И вот оказывается, что даже одна-единственная аэрозольная частица размером всего 0,1 мкм и массой около 10^{-15} г может испортить микросхему. А ведь аэрозольные частицы всегда присутствуют в воздухе.

Они возникают при химических реакциях между газовыми примесями в воздухе, образуются при соприкосновении движущихся частей и трении между предметами, например при ходьбе, когда подошвы трутся о поверхность пола. Наконец, аэрозольные частицы выделяются с человеческим дыханием. Поэтому если не принимать специальных мер, а готовить микросхемы в обычном воздухе, которым мы можем дышать безо всякого вреда, то не менее 99% микросхем будут забракованы. Поэтому приходится прибегать к специальной планировке помещений, продумывать систему фильтрации поступающего в помещение воздуха, устранять все мыслимые источники аэрозолей. Чистота технологической атмосферы в таких производствах должна тщательно контролироваться фотоэлектрическими счетчиками аэрозольных частиц.

Серьезные неприятности причиняют аэрозоли в теплоэнергетике, причем не только те аэрозоли, которые образуются при сгорании топлив и выбрасываются электростанциями, но и мельчайшие капельки, образующиеся в соплах паровых турбин. Тепло сгоревшего топлива, а на атомных электростанциях — энергия распада ядерного горючего воспринимаются теплоносителем, в качестве которого может использоваться вода, некоторые органические жидкости, а также щелочные металлы. Теплоноситель испаряется, и его перегретый пар под значительным давлением выпускается через сопло Лавала (обеспечивающее сверхзвуковое течение газа) на лопатки паровой турбины, которая вращает ротор электрического генератора. В сопле достигается сверхзвуковая скорость течения и одновременно происходит адиабатическое (без обмена энергии) охлаждение пара теплоносителя. При этом часть пара теплоносителя конденсируется с образованием мельчайших частиц, что само по себе снижает КПД турбины, поскольку инерционность частиц тормозит разгон

потока пара в сопле. Но еще хуже эрозионное воздействие капелек на лопатки турбин. Разогнанные до сверхзвуковой скорости, жидкие капельки приобретают способность вырывать при ударе о поверхность крупницы металла, которые подхватываются и уносятся потоком пара. И это несмотря на то, что лопатки турбин изготавливаются из высококачественных, очень прочных сортов стали. Капельная эрозия приводит к преждевременному износу турбин. Для уменьшения этого эффекта стараются найти режимы течения, обеспечивающие наименьшую степень конденсации, наименьший размер частиц. Подбирают форму сопла, вводят добавки, способствующие образованию большого количества очень мелких капель, а не малого числа крупных. Для разработки этих приемов пришлось в течение многих десятилетий изучать законы конденсации в соплах и законы течения потоков, содержащих капельки конденсата.

Аэрозольная эрозия деталей двигателей может происходить под действием взвешенной в воздухе дорожной пыли. Для ее предотвращения воздухозаборники двигателей снабжают фильтрами. Без этих фильтров ресурс двигателей был бы очень короток — в пустынных районах, где минеральной пыли в воздухе много, двигатели автомобилей выходили бы из строя или теряли бы значительную долю мощности всего через несколько десятков часов эксплуатации.

Многие промышленные производства связаны с получением измельченных горючих материалов. Мукомольная, сахарная, лесопильная промышленность, производства порошка какао и сухого молока — все эти отрасли технологии дают продукты, которые легко образуют концентрированные аэрозоли, аэровзвеси. А взвесь горючих частиц в воздухе способна взорваться. Раздробленность горючего вещества в аэрозольном состоянии обеспечивает легкий доступ кислорода воз-

духа к поверхности, развитая поверхность обеспечивает большую скорость горения, интенсивное выделение энергии. Взрыв может произойти лишь при достаточно высокой концентрации аэрозольных частиц, если облачко пламени при горении одной частицы будет не меньше среднего расстояния между частицами и сможет воспламенить соседние частицы. Тогда фронт пламени способен распространяться в облаке со скоростью взрыва. Взрывы пылевых облаков представляют большую опасность. Их разрушительная сила очень велика. Поэтому нельзя допускать скопления горючих порошков. В этом случае достаточно случайной искры, чтобы вызвать взрыв и пожар. Горючие порошки необходимо увлажнять растворами с добавками связующих веществ, чтобы предотвратить взрыв.

Причиной взрывов и пожаров могут быть даже водные аэрозоли. При распылении растворов электролитов — а даже пресная вода всегда содержит достаточное количество растворенных солей — наблюдается электрическая зарядка капель — баллоэлектрический эффект. В зависимости от природы электролита на поверхности жидкости преимущественно адсорбируются катионы или анионы. Распыление жидкости заключается в отрыве участков на поверхности жидкости, уносе их мелкими капельками. На участках свежей поверхности адсорбция ионов произойти не успевает, и капли, образовавшиеся во вторую очередь, оказываются заряженными. Возникшие при уносе участков «старой» поверхности капельки будут обогащены адсорбированными ионами и заряжены иным знаком. В результате распыления образуются биполярно заряженные аэрозоли, причем разный знак заряда соответствует капелкам различного размера, что способствует объемному разделению заряда, накоплению зарядов различного знака в различных участках пространства.

Баллоэлектрический эффект наблюдается при мойке струями морской воды резервуаров нефтеналивных судов. Причем накапливается такой объемный заряд, что происходят молниеподобные электрические разряды. В атмосфере резервуаров содержатся пары нефтепродуктов, и электрический разряд может вызвать взрыв. Для подавления баллоэлектрического эффекта к морской воде добавляют поверхностно-активные вещества в правильно подобранной пропорции, что препятствует разделению зарядов при распылении.

Уже сотни лет назад высказывалась догадка, что болезнь может передаваться от одного больного к другому через воздух. Но лишь с развитием планомерных исследований аэрозолей было доказано, что люди чаще всего заражаются такими болезнями, как острые респираторные заболевания, грипп, туберкулез легких, легочная чума, менингит, орнитозы, вдыхая аэрозоли микробиологической природы.

Вирусы и многие бактерии не могут существовать вне жидкой питательной среды и погибают при высыхании. Они могут сохранять жизнеспособность, только пока не высохли капельки жидкости, в которых они заключены. Такими капельками могут быть брызги слюны или слизи. Но есть спорообразующие бактерии. Споры могут сохранять жизнеспособность в высушенном состоянии в течение месяцев или даже лет.

Размер бактерий составляет от одного до нескольких микрон, а споры обычно не крупнее 2 мкм. Аэрозольные частицы таких размеров осаждаются в носоглотке и верхних дыхательных путях, где бактерии находят себе подходящую среду для размножения. Вирусы намного мельче бактерий — от сотой до десятых долей микрон, но возможность их проникновения в дыхательные пути определяется не их собственным размером, а величиной капелек субстрата, в котором они заключены.

При чихании, кашле и даже просто при разговоре образуется большое количество частиц слюны или слизи размером от одного до ста микрон, вылетающих со значительной скоростью. Чем крупнее капельки, тем медленнее они тормозятся в воздухе, наиболее крупные капельки могут пролетать расстояние до метра. Некоторые капельки могут непосредственно проникать в дыхательные пути других людей, а большинство капелек осаждается на предметах, высыхает, оставляя споры на поверхности. Эти споры могут потом сдуваться, стряхиваться, снова переходить в аэрозольное состояние. Серьезным источником бактериальных аэрозолей является перестилание постельного белья больных, сопровождающееся встряхиванием одеял, простыней. Об этом надо помнить, если в доме есть больной.

Много неприятностей доставляют бактериальные аэрозоли в животноводстве, птицеводстве. На современных птицефабриках курица всю жизнь проводит в клетке, не видя солнечного света. При этом она должна каждый день нести яйца. Это большая нагрузка для организма и одновременно очень важное дело. Ведь разведение цыплят — самый быстрый способ получения животного белка. Но, лишённая солнца, прогулок по свежему воздуху, занятая работой по несению яиц, курица становится легко уязвимой для переносимых по воздуху инфекций. Приходится фильтровать воздух, подаваемый в клетки, строить здания на большом удалении друг от друга, чтобы предотвратить распространение массовых заболеваний от одного корпуса птицефабрики к другому. Но и это не дает гарантий от вспышек и распространения эпизоотий.

Серьезные задачи по подавлению бактериальных аэрозолей приходится решать при строительстве предприятий консервной промышленности. Но особенно большой тщательности требует защита питательных

сред в микробиологической промышленности при производстве антибиотиков. Существуют бактерии и вирусы, способные свести насмарку всю работу микроскопических грибов, вырабатывающих лекарственные антибиотики.

Огромный вред процессам ферментации в пищевой промышленности, особенно при производстве молочнокислой продукции, в сыроделии, приносят фаги — вирусы, поражающие полезные бактерии, из которых состоят закваски. Фаги тоже переносятся через аэрозольное состояние в клетках взвешенных в капельках субстратов бактерий. Фаги поражают бактерии заквасок, размножаются в них, и закваска слабеет, теряет способность выделять ферменты, расщепляющие молекулы исходных продуктов. Наступает фаголизис — явление разрушения закваски фагами.

Из-за поражения заквасок фагами невозможно использовать одну и ту же закваску более трех раз, и необходимо постоянно выращивать в стерильных условиях новые порции свежей закваски.

Аэрозоли-убийцы

Запах яблоневого цвета и радиоактивные дожди. Сам термин «аэрозоль», увы, обязан своему происхождению войне. Первая мировая война ознаменовалась появлением и широким массовым применением нового вида оружия массового уничтожения людей — химического. Вначале его называли словом «газы» — и вполне справедливо, ведь первое применение химического оружия, состоявшееся 15 июня 1915 г. на француско-германском фронте, заключалось в выпуске газообразного хлора из баллонов. Десятки тысяч солдат были отравлены, прежде чем было найдено средство от газов — противогаз и освоен его массовый выпуск. Газы имеют свойство легко адсорбироваться твердыми

поверхностями. Большой скорости адсорбции способствует большая величина коэффициента молекулярной диффузии. Поэтому достаточно пропустить вдыхаемый человеком воздух через слой активированного угля — адсорбента, обладающего большим количеством пор, т. е. очень большой удельной поверхностью, чтобы ядовитый газ был удален из воздуха.

Но вскоре немецкие военные химики нашли способы создания ядовитых облаков, частицы которых могли проходить через первые противогазы. Они разработали дымовые шашки, в которых возгонялись соединения мышьяка, в первую очередь дихлордифениларсин, или чихательный газ. Испарившиеся при горении шашки пары этого вещества конденсировались в воздухе с образованием аэрозольных частиц. Коэффициент броуновской диффузии аэрозольных частиц на четыре-пять порядков меньше коэффициента диффузии газовых молекул, и он обратно пропорционален корню из массы частицы. Поэтому, когда ядовитый аэрозоль просасывается через противогазную коробку, частицы не успевают достичь поверхности зерен активированного угля. А те, которые все же коснулись зерен, не могут протиснуться в глубь узких пор, осаждаются на внешней поверхности гранул угля, которая составляет лишь ничтожную часть всей поверхности.

Затем американские ученые создали отравляющее вещество — люизит, или бета-хлорвинилдихлорарсин, — пары которого образуют в атмосфере конденсационный аэрозоль. Способны конденсироваться в аэрозоль и пары иприта.

Для этих новых отравляющих облаков английский химик Доннан предложил по аналогии с уже существовавшим понятием гидрозоля термин «аэрозоли». Применение отравляющих веществ в форме аэрозолей оказалось более эффективным. Аэрозольные облака медленнее рассеиваются в атмосфере, в меньшей мере за-



хватываются почвой и растительностью. В капельно-жидкой форме отравляющие вещества представляют большую опасность для незащищенных кожных покровов. Конечно, часть отравляющего вещества может находиться в виде аэрозоля, а часть — в паровой фазе, особенно при положительных температурах. Поэтому аэрозольное облако может иметь достаточно сильный запах. В годы первой мировой войны, когда не было приборных средств обнаружения химического нападения, именно запах часто служил сигналом для надевания противогазов. Запах цветущих яблонь, присутствующий люизиту, или горчичный запах иприта вселяли ужас в солдат воюющих сторон.

Ученые искали пути усовершенствования противогазов, чтобы обеспечить защиту людей от ядовитых аэрозолей. Было ясно, что надо отфильтровать воздух от ядовитых частиц подобно тому, как фильтруют жидкости. Но специальных аэрозольных фильтров, способных полностью улавливать аэрозоль при небольшом сопротивлении дыханию, в то время еще не было — они были созданы лишь два десятилетия спустя. Противогазы начинали слоями марли и ваты. Но при малой толщине они не полностью обеспечивали защиту от аэрозолей, а при большой толщине солдатам было трудно дышать, они не выдерживали, срывали защитные маски. Сотни тысяч людей убило химическое оружие в первую мировую войну, десятки тысяч сделало инвалидами.

Еще большую опасность представляет для человека бактериологическое оружие. Одной из основных предполагаемых форм применения этого ужасного оружия может быть распыление с самолета культур бактерий или вирусов — опять же в форме аэрозолей.

Защита от бактериологического оружия — дело более сложное, чем защита от отравляющих веществ. Ведь если самое токсичное отравляющее вещество име-

ет смертельную дозу не меньше 10^{-4} г, то по массе это равно 10^{11} частиц радиусом 0,1 мкм. А такое количество аэрозольных частиц не пропустит ни один современный фильтр. Бактерии надо ловить тщательнее — тут счет идет буквально на штуки. Но и это обеспечивается современными средствами защиты.

Все знают, что взрыв ядерной бомбы сопровождается образованием грибовидного облака. А облако — это аэрозоль. Частицы аэрозолей при ядерном взрыве могут образоваться двояким путем. Энергия взрыва испаряет конструкционные материалы бомбы, остаток ядерного заряда и продукты его распада. При охлаждении плазменного огненного шара, образующегося на месте взрыва, эти продукты конденсируются, причем радиоактивные элементы захватываются при образовании аэрозольных частиц. Если взрыв произошел достаточно близко к земной поверхности, то он вздымает огромное количество пыли, на этих частицах также могут осаждаться атомы радиоактивных элементов.

Грубые пылевые частицы выпадают на расстоянии нескольких километров от эпицентра взрыва, создавая зараженную зону. Более мелкие уносятся на большие расстояния, увеличивая протяженность зараженной зоны от крупных ядерных боеприпасов до сотен километров. Самые мелкие частицы — носители радиоактивности могут даже обойти весь земной шар. Радиоактивная пыль вымывается дождевыми каплями. В 1954 г. радиоактивный дождь прошел над японской рыболовной шхуной «Фукурумару NS». Шхуна совершала плавание в сотнях километров от места взрыва американской термоядерной бомбы на атолле Эниветок. Но количество радиоактивных веществ, которое вымыл из радиоактивного аэрозоля дождь, оказалось достаточным для тяжелого заболевания членов команды и смерти от лучевой болезни радиста шхуны.

Радиоактивные частицы способны осаждаться в лег-

ких людей и непосредственно из атмосферы. К 1963 г. в результате многих серий испытаний ядерного оружия радиоактивные частицы стали постоянным компонентом атмосферы. Достаточно было несколько часов просасывать воздух через аэрозольный фильтр, потом приложить его к фотопленке — и на проявленной фотопленке проступали сотни звездочек, образованных треками от продуктов радиоактивного распада, — автопортреты радиоактивных, или, как их еще называют, «горячих», частиц. Воздух планеты стал опасным для здоровья людей. В результате твердой последовательной позиции Советского правительства, выступлений мирового общественного мнения был заключен Договор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, и атмосфера начала очищаться от радиоактивного загрязнения. Голос ученых-аэрозольщиков звучал громко и убедительно в хоре борцов против ядерного отравления и сыграл не последнюю роль в осознании человечеством этой страшной опасности.

Мы видели, что использование всех видов оружия массового поражения связано с образованием аэрозолей, аэрозоли являются основным поражающим фактором этих видов оружия. Поэтому и защита от аэрозолей, создание высокоэффективных фильтрующих материалов являются важным вкладом в укрепление обороноспособности страны.

Шапка-невидимка для корабля и танка. Виднейший специалист по толкованию сказочных образов русского фольклора А. Н. Афанасьев объясняет, что шапка-невидимка — это метафорическое отражение дымов и туманов, способных скрыть от человеческого взора что угодно. Как видно, способность аэрозолей к светорассеянию была замечена людьми в далекой древности. Со временем аэрозоли стали использовать для целей маскировки. Дымами пользовался монгольский полко-

водец Субудай-багатур в битве при Лигнице, шведский король-полководец Карл XII. Широко применялись дымовые в первую мировую войну и в Великую Отечественную. Без использования дымов не обходились десантные операции, форсирование рек. Под сплошным дымовым завесам подвозились через Волгу подкрепления и боеприпасы защитникам Сталинграда.

Современные принципы наведения могут быть самыми различными. Широкий диапазон длин волн излучений, используемых системами обнаружения и наведения, — тут и видимое, и инфракрасное, и радиолокационное излучение, излучение узкополосное — лазерное, радиолокационное и в широком участке спектра — солнечное, собственное тепловое. Излучение может быть когерентным и некогерентным, поляризованным и неполяризованным, и эти обстоятельства могут использоваться для отстройки систем наведения от всевозможных помех.

Аэрозоли как раз и представляют помеху. Они рассеивают направленный на цель луч, ослабляют собственное излучение цели, попросту не позволяют видеть цель. Когда речь идет о системах разведки и наведения, работающих в видимом диапазоне спектра, эффективность любых аэрозолей оказывается высокой.

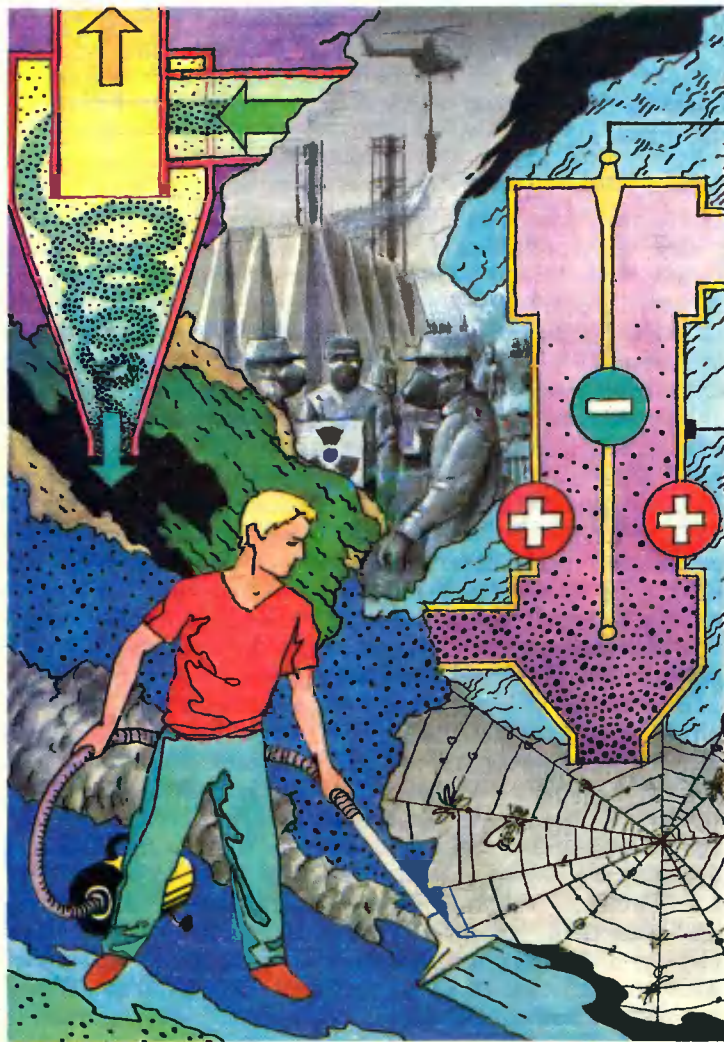
Возможность иметь дымовую шапку-невидимку для защиты от управляемого оружия представляется военным настолько заманчивой, что, по сообщениям иностранной печати, инженеры-химики работают над расширением возможностей использования маскирующих аэрозолей для создания завес, через которые видно в одну сторону, а в другую — нет, ищут пути маскировки от радиоволнового излучения, защиты от мощного лазерного излучения и светового излучения ядерного взрыва. Есть сообщения о попытках создать облака в новых средах — в верхних слоях атмосферы, в космическом пространстве. Можно ли причислять маски-

рующие аэрозоли к аэрозолям-убийцам? Ведь, казалось бы, это средство защиты. Да, но ведь в первую очередь защищают этими аэрозолями не гражданские объекты, а боевые машины, несущие наступательное оружие.

Арсенал защитных средств

Поскольку аэрозоли угрожают здоровью людей, нарушают ход процессов тонкой химической технологии, изменяют саму среду человеческого обитания, с ними приходится бороться, создавать методы их разрушения. Самый правильный путь борьбы с нежелательными аэрозолями — это не допускать их образования. Но слишком многие процессы неизбежно сопровождаются образованием аэрозолей: горение, плавка, резка, сварка металлов, дробление материалов и горных пород. Причем это не только наносит ущерб здоровью людей, окружающей среде, народному хозяйству, но зачастую мы теряем ценные материалы. Летучая зола, содержащая многие ценные химические элементы, например ванадий, тоннами уносится через трубы тепловых электростанций. Сернистый газ, образующийся при сжигании серосодержащих топлив, может быть превращен в серную кислоту или в гипс. Цементная пыль, которая губительно воздействует на природу в радиусе многих километров от цементного завода, одновременно представляет собой наиболее тонкую, высокосорточную фракцию цемента. Практическую ценность представляют сажа, угольная пыль, окислы металлов — практически все, что иногда еще и в наше время выбрасывают через дымовые трубы.

Основной подход, обеспечивающий и сохранность окружающей среды, и комплексное использование сырья, побочных продуктов производства, — это создание новых, безотходных технологий. Принцип безотходной технологии был впервые сформулирован од-



ним из авторов этой книги совместно с академиком Н. Н. Семеновым в конце 60-х гг. на совещании по проблемам развития Кемеровского промышленного района. В 70-х гг. он был одобрен Европейской экономической комиссией ООН. Но существующая промышленная база создавалась в течение десятилетий. Многие заводы были построены в те времена, когда до конца не были осознаны ни угроза среде обитания, которую несут неграмотно спроектированные технологические процессы, ни ограниченность ресурсов сырья. Изменить технологический процесс не всегда можно. Поэтому приходится оснащать предприятия системами пылеподавления, пылеулавливания. Новые предприятия тоже оснащаются такими системами. Но при правильной организации технологического процесса потребуются очистные сооружения меньшей мощности, и функция их будет сводиться не только к очистке газовых потоков, но и к извлечению ценных продуктов.

Искусственные ураганы, ливни, электрические разряды на службе пылеулавливания. С точки зрения гидродинамики основное свойство аэрозолей — это способность перемещаться как единое целое. Но частицы могут смещаться и относительно газовой среды, в которой они взвешены. В результате этого они в конце концов достигают поверхности твердого тела или жидкости, прилипают к твердой поверхности или тонут в жидкости. Разрушение аэрозолей и основано на том, что частицы смещаются относительно искривленных линий тока среды и захватываются твердыми и жидкими поверхностями.

Содержание аэрозолей в технологических потоках, отходящих газах, загрязненной атмосфере редко превышает 10 г/м^{-3} . Чтобы достигнуть твердой поверхности, этим частицам необходимо пройти путь не более метра, иногда доли миллиметра. Чтобы поднять

массу 10 г на 1 м, необходимо совершить работу 0,1 Дж. При промышленных же методах разрушения аэрозолей для очистки 1 м³ газа от аэрозольных частиц приходится затрачивать от 7 до 3000 Дж/м⁻³ в зависимости от степени улавливания и принципа работы устройства.

Почему же расход энергии на разрушение аэрозолей столь велик?

Газовая среда оказывает сопротивление движению частиц. Для не слишком маленьких (крупнее 1 мкм) и не слишком больших частиц сила сопротивления определяется формулой Стокса $F=6 \pi \eta V$ (η — радиус частицы, η — вязкость воздуха, V — скорость движения частицы). При $V=10$ см/с⁻¹, а именно таков порядок скорости движения частиц в пылеосадительных аппаратах, сила сопротивления движению частицы радиусом 1 мкм в 1000 раз больше силы тяжести, действующей на частицу. Поэтому расход энергии (для улавливания частиц) намного больше энергии, необходимой для поднятия тела, масса которого равна массе аэрозольных частиц в 1 м³, на высоту 1 м.

Аэрозольные частицы способны смещаться относительно газовой среды сами по себе, поскольку они обладают энергией теплового (броуновского) движения. Но скорость этого движения (броуновской диффузии частиц) достаточно велика, чтобы обусловить их осаждение за короткое время (не более секунд), только для очень маленьких частиц, размером менее 0,1 мкм. Основную же массу аэрозольных загрязнений составляют частицы крупнее 1 мкм, скорость теплового смещения которых ничтожна.

Сила тяжести может заставить оседать частицы радиусом 1 мкм со скоростью всего 0,01 см/с⁻¹. Сила тяжести растет пропорционально кубу размера частиц, а сила сопротивления — пропорционально размеру. Поэтому уже для частиц размером 50 мкм ско-

рость гравитационного осаждения оказывается достаточно большой. Сила гравитации «работает» в пылеосадительных камерах, предназначенных для предварительной очистки потоков, удаления наиболее крупных частиц и облегчения нагрузки на пылеулавливающие установки, которые обеспечивают высокую степень очистки от более мелких частиц с использованием других физических воздействий. Осадительные камеры — это емкости, разделенные горизонтальными полками для уменьшения пути осаждения частиц.

Большее воздействие, чем гравитация, на частицы может оказать центробежная сила. Для ее создания поток аэрозоля пропускают через «циклон» — устройство, в котором поток закручивается вихреобразно (см. рис. на с. 67). Конечно, вихрь в «циклоне» в миллион раз меньше атмосферных циклонов, несущих с собой перемену погоды и дожди, очищающие атмосферу от пыли. Но зато угловая скорость вихря, а следовательно, и центробежная сила, действующая на частицы, в искусственном циклоне на много порядков больше, чем в атмосферном. Запыленный поток входит в «циклон» через тангенциальный штуцер по касательной, закручивается, спирально спускается вниз, резко по-

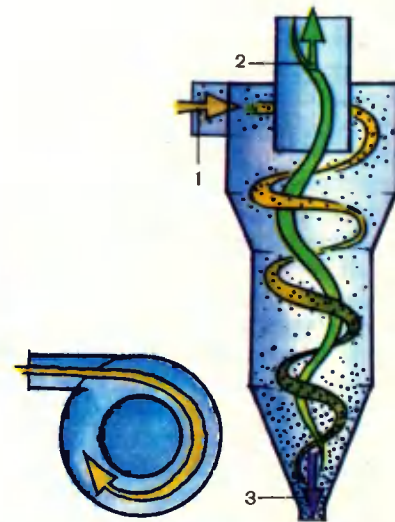


Схема работы Циклона:
1 — вход газа; 2 — выход очищенного газа; 3 — выход жидкости.

ворачивает и еще более закрученным поднимается к выходу. Под действием центробежной силы частицы из внешнего потока осаждаются на стенки и осыпаются вниз. Из центрального потока,двигающегося противотоком к периферическому, частицы забрасываются в этот внешний поток, откуда они тоже осаждаются. Особенно интенсивно происходит выброс частиц в точке перехода внешнего потока во внутренний. Если нижнее отверстие циклона не закрывать, а сам циклон перевернуть, то во время его работы частицы будут вылетать через это отверстие. Но газ будет выходить, где ему положено, а не вместе с частицами — настолько интенсивно протекает сепарация частиц.

Циклон работает тем лучше, чем меньше его диаметр и чем больше скорость потока. Понятно, что лучше улавливаются крупные частицы. Циклон диаметром 0,25 м полностью задерживает частицы диаметром 5 мкм, а полуметровый циклон улавливает лишь частицы крупнее 12 мкм. Но производительность большого циклона будет при этом в 50 раз выше. Если надо очищать большие потоки от относительно мелких частиц — около 5 мкм диаметром, то ставят большой циклон и параллельно много маленьких — такая система называется мультициклоном.

Все же циклоны, как и осадительные камеры, можно рассматривать только как системы предварительной очистки. Энергии они потребляют сравнительно немного — 10—20 Дж/м⁻³. Для улавливания более мелких частиц используют электрофилтры, скрубберы и рукавные филтры.

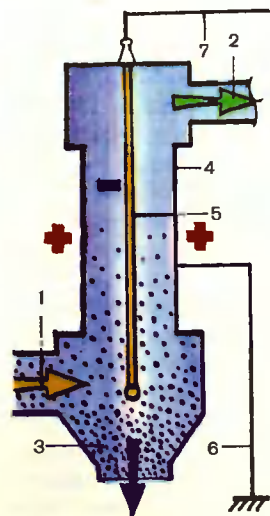
На службу очистки воздуха можно поставить электричество. Для этого частицы необходимо наделить электрическими зарядами, причем, чтобы все частицы двигались в определенную сторону, они должны иметь заряд одного знака.

Частицы можно зарядить различными способами.

Многие процессы образования аэрозолей сами по себе сопровождаются зарядкой частиц: баллоэлектрической зарядкой — при распылении жидкостей, трибоэлектрической — при распылении порошков, конденсацией пара на газовых ионах. Аэрозольные частицы имеют способность захватывать ионы, всегда содержащиеся в атмосферном воздухе. Но во всех этих случаях частицы приобретают заряды обоих знаков, происходит биполярная зарядка, а нужна униполярная.

Такая зарядка происходит в коронном разряде. Если на электрод, имеющий вид тонкой проволоки, подать высокое напряжение — 25—100 киловольт, то вокруг него вспыхнет голубоватый ореол коронного разряда. Это — создание газовых ионов. Ионы захватываются аэрозольными частицами, одна частица может приобрести до 10⁴ элементарных зарядов. Под действием электрического поля частицы приобретают скорость до 0,1 м/с⁻¹, что достаточно для их осаждения при пребывании в электрическом поле в течение нескольких секунд. Электрофилтры могут быть с предварительной зарядкой и с зарядкой непосредственно в осадительной секции. В первом случае частицы сначала поступают в камеру с коронирующим электродом, а потом поток пропускается между параллельными пластинами, на которых имеется разность потенциалов в несколько киловольт. Электрофилтрация — наименее энергоемкий процесс из всех способов разрушения аэрозолей. При степени улавливания субмикронных частиц 99,5% электрофилтр может потреблять 7—100 Дж/м⁻³. В прежние годы строились электрофилтры с эффективностью 90—95%, а сейчас многие установки имеют эффективность 99,8—99,9%. Электрофилтрами можно улавливать как твердые, так и жидкие частицы. В первом случае частицы стряхиваются с осадительного электрода, во втором — смыываются.

Электрофилтры работают плохо, если низка элек-



Устройство электрофилтра:
1 — вход загрязненного газа; 2 — выход очищенного газа; 3 — бункер; 4 — осадительный электрод (труба электрофилтра); 5 — коронирующий электрод; 6 — заземленный провод; 7 — постоянный ток высокого напряжения (отрицательный полюс).

тропроводность вещества частиц. По мере накопления осадка на осадительном электроде образуются точки, где скапливается электрический заряд, и может произойти образование обратной короны. При этом произойдет искровой разряд с коронирующего электрода на осадительный, резко возрастет потребление энергии, упадет разность потенциалов между пластинами, прекратится осаждение частиц и может выйти из строя блок питания электрофилтра. Электрофилтры проектируют строго под определенную электропроводность осадка. Если она окажется выше расчетной, во избежание обратного коронирования придется снижать рабочее напряжение, а это приведет к падению эффективности улавливания. Трудность заключается в том, что электропроводность осадка нельзя предсказать теоретически. На осадительном электроде образуется очень рыхлый слой частиц, площадь контакта между части-

цами в осадке мала, и электропроводность низка. И зависит она не только от природы частиц, но и от условий осаждения. Поэтому приходится строить модельный электрофилтр, набирать в нем слой осадка и измерять его электропроводность. А бывает так, что электростанцию снабдят фильтрами, рассчитанными на золу от угля определенного месторождения, а потом переведут на снабжение совсем другим углем, осадок золы которого имеет другие электрические свойства. Эффективность улавливания резко упадет, возрастет загрязненность воздуха в районах, прилегающих к электростанции. Если, например, для обеспечения концентрации частичек золы в воздухе на безопасном уровне необходима расчетная эффективность улавливания 99,5%, а вследствие перехода на другой уголь — 90%, концентрация загрязнений возрастет в 20 раз.

Использование электрофилтров при повышенных температурах избавляет от необходимости слишком сильно охлаждать топочные газы и потоки, например, от цементных печей и обжига руд.

Основным механизмом двух других методов улавливания аэрозолей является инерция.

При обтекании потоком аэрозоля препятствий траектории линии тока газа искривляются. Но, поскольку масса аэрозольных частиц намного больше массы газовых молекул, аэрозольные частицы не успевают менять направления своего движения так же быстро, как поток газа. Поэтому траектории аэрозольных частиц при обтекании отличаются от линий тока газа, частицы движутся ближе к отбегаемому препятствию и могут зацепить его и прилипнуть к нему. Обтекаемым препятствием могут быть нити, частицы рыхлого осадка, капли жидкости, летящие через аэрозоль, пленки жидкости, через которую двигаются пузыри аэрозоля.

Устройства, где аэрозольные частицы вымываются из газового потока жидкостью, называются скруббе-

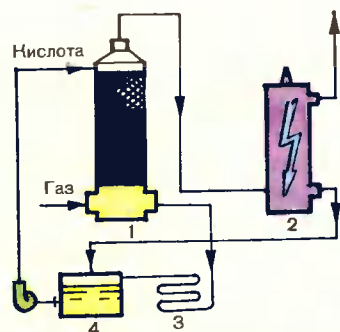


Схема отделения конденсата с орошаемой башней:
1 — башня-конденсатор;
2 — электрофильтр;
3 — холодильник; 4 — сборник кислоты.

рами. В распылительных скрубберах поток аэрозоля орошают водяным спреем. Капли захватывают аэрозольные частицы. Капли, которые имеют размер сотни микрометров, нетрудно отделить от газового потока пластиной-отбойником, жалюзийной решеткой или циклоном. Эффективность увеличивается, если распыляют перегретую воду. Часть ее испаряется, а затем пар конденсируется на каплях, увлекая мелкие частицы. Увлечение аэрозольных частиц потоком диффундирующего пара называется диффузиофорезом. Это явление лучше проявляется в отношении мелких частиц, которые хуже осаждаются под действием инерционных сил. Поэтому конденсацию пара применяют для повышения эффективности скрубберов по отношению к мелким частицам. В последнее время появились скрубберы повышенной эффективности: при распылении жидкости каплям сообщается электрический заряд, или улавливаемый аэрозоль заряжается, либо и капли и аэрозоль. Благодаря диффузионному захвату скрубберы улавливают и очень мелкие частицы, например металлургические дымы, частицы которых имеют размер порядка сотых долей микрометра.

Бывают также колонные скрубберы: поток аэрозоля пропускается через колонну с тарелками, в кото-

рых имеются отверстия, а навстречу потоку аэрозоля стекает вода. Аэрозоль с воздухом пропускают через слой воды на тарелках, причем частицы захватываются водой. Колонна вместо тарелок может быть заполнена насадкой — шарами, кольцами или другими геометрическими фигурами. Улавливание происходит при одновременном пропускании аэрозоля и орошении насадки жидкостью.

Скрубберы — несложные устройства, изготовление их намного дешевле электрофильтров. Но они потребляют много энергии из-за большого перепада давления при прохождении газового потока через скруббер и расхода энергии на распыление жидкости. Энергоемкость пылеулавливания в скрубберах составляет 1000—3000 Дж/м³. Кроме того, они расходуют несколько литров воды на 1 м³ аэрозольного потока, и приходится заботиться об очистке этих сточных вод. Достоинство скрубберов — возможность одновременно улавливания аэрозолей и водорастворимых газов с неприятным запахом.

Когда аэрозольный поток содержит много субмикронных частиц (меньше микрона), а эффективность улавливания должна превысить 99,5%, применяют тканевые или рукавные фильтры, например фильтрующий мешок бытового пылесоса. Обтекая волокна фильтрующего материала, частицы осаждаются за счет инерции, диффузии, электрических сил между заряженными частицами и волокнами. Кроме того, некоторую роль играет ситовый эффект — застревание частиц в проходах меньшего размера.

Для прокачивания аэрозоля через фильтр необходим расход энергии на преодоление гидравлического сопротивления фильтра. По мере накопления застрявших в фильтре и осевших на его лобовой поверхности частиц сопротивление фильтра растет, но одновременно увеличивается и его эффективность, поскольку

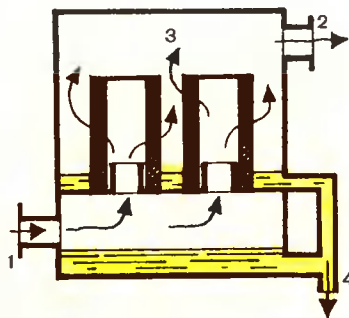


Схема волокнистого фильтра: 1 — вход газа; 2 — выход очищенного газа; 3 — фильтрующий слой; 4 — сток конденсата.

ку слой частиц на поверхности фильтра сам обладает фильтрующим действием. Чтобы предотвратить чрезмерный рост сопротивления фильтра, осадок частиц периодически удаляют. Для этого фильтры, имеющие форму рукавов или мешков, растянутых кольцевыми распорками, периодически стряхивают или продувают обратным потоком воздуха, который может подаваться в виде коротких импульсов.

Фильтры не годятся для улавливания жидких или липких частиц. Они боятся высоких температур. Даже фильтры из полимерных термостойких волокон не могут выдерживать температуру более 250° . Поэтому горячие технологические потоки приходится охлаждать. Все же высокая эффективность улавливания субмикронных частиц делает фильтры единственным пригодным средством разрушения аэрозолей во многих случаях. Скрубберы предпочитают фильтрам, когда не требуется высокой эффективности, а места мало — фильтры довольно громоздки. Электрофильтры имеют преимущества, когда эффективность улавливания не должна превышать 99,5%, субмикронных частиц в аэрозоле мало и состав аэрозоля не может меняться.

Энергозатраты при очистке газов тканевыми фильтрами зависят от дисперсности частиц и необходимой

степени очистки и составляют 100—3000 Дж/м³, что существенно ниже, чем при очистке газов другими методами.

Искусственная паутина (волоконистые фильтры). Повысить эффективность фильтрации и одновременно снизить сопротивление фильтра, затраты энергии можно, уменьшая размер волокон тканей, из которых изготавливаются фильтры. Они имеют диаметр в десятки микрон. А если иметь волокна толщиной в микроны, в десятые и сотые доли микронметра? Мысль об использовании ультратонких волокон для фильтрации аэрозолей пришла одному из авторов этой книги около 50 лет назад. Но способов получения столь тонких волокон тогда не было. Подходящим материалом казались полимеры, поскольку их можно растворять, а возможность испарения растворителя — это путь для уменьшения размера. Можно же получать мельчайшие твердые частицы, испаряя сильно разбавленные растворы солей. Но как превратить раствор полимера не в капли, а в нити? Пришлось повозиться не один месяц, пока не было найдено новое физико-химическое явление, благодаря которому можно получать полимерные нити, во много раз более тонкие, чем паутина.

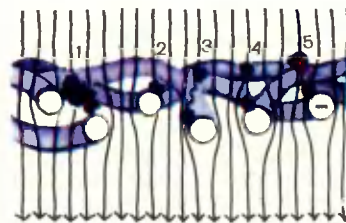
Материалы из ультратонких полимерных волокон получили название фильтров Петрянова (ФП). Сейчас выпускается большое количество различных сортов материалов ФП, предназначенных для работ при высоких и низких температурах, в агрессивных и высоко-радиоактивных средах, для улавливания бактериальных аэрозолей и т. д.

Главное достоинство материалов ФП — это абсолютная эффективность улавливания частиц всех размеров при очень низком сопротивлении. А что значит низкое сопротивление фильтра? Возьмем, например, защиту органов дыхания человека от радиоактивных



Так делают фильтр Петрянова (ФП).

или бактериальных аэрозолей. Непоправимые последствия может вызвать одна радиоактивная частица или несколько болезнетворных бактерий, попавших в организм. А в определенных условиях количество таких частиц в одном вдохе может достигать сотен миллионов. Значит, нужна эффективность улавливания 99,99999%. Если ставить много слоев тканевого фильтра, чтобы обеспечить необходимую эффективность, то у человека

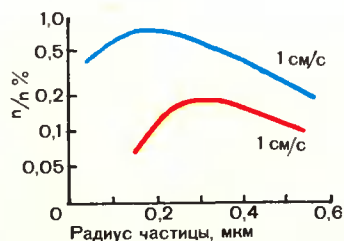


Механизмы захвата частиц волокнистыми фильтрами: обычный механизм «сита» (1), эффект касания (2), диффузионный (3), инерционный (4), электростатический (5).

просто не хватит сил продохнуть такой фильтр. А фильтр Петрянова обеспечивает достаточную эффективность в тонком слое. Респиратор «Лепесток», надежно защищающий органы дыхания, изготовленный из материала ФП, имеет вид легкой марлевой повязки.

Волокнистые фильтрующие материалы употребляются тогда, когда необходима очень высокая степень улавливания наиболее вредных аэрозолей. Засевшие в фильтре частицы держатся крепко и вытряхнуть их оттуда невозможно, поэтому такие фильтры используются один раз.

Фильтрующие материалы ФП сыграли большую роль при развитии атомной промышленности, обеспечив надежную защиту людей и эффективное улавливание радиоактивных частиц из отходящих потоков. Существуют разновидности материалов ФП, обеспечивающих одновременное улавливание и аэрозолей, и высокотоксичных или радиоактивных паров ртути, иода, соединений полония. Благодаря применению респираторов из материалов ФП в нашей стране исчез целый ряд профессиональных заболеваний, например отравление парами ртути. В десятки раз снизился уровень интоксикаций аэрозолями в производстве свинца. Надежной защитой органов дыхания служили «Лепестки» в дни ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. «Лепестки» производятся ежегодно сотнями миллионов экземпляров. Они дешевы. После



Зависимость числа частиц, прошедших через фильтр, от их размера изображается кривой с максимумом. Пропускание аэрозоля возрастает с увеличением скорости течения аэрозоля (цифры у кривых).

одноразового использования их выбрасывают.

ФП обладают целым набором удивительных свойств и могут иметь весьма широкое применение. Ими можно фильтровать жидкости, предназначенные для современных процессов технологии электронных приборов, когда необходима абсолютная чистота. Эти материалы — прекрасный теплоизолятор и применяются в криогенной технике. В аптеках продаются противושумные вкладыши «Беруши». Эти вкладыши представляют собой маленькие квадратики из материала ФП. Квадратик вставляется в ушной канал и благодаря эластичности и упругости материала заполняет все сечение канала сложной геометрии.

Материалы ФП можно использовать как электро- вещества, способные подолгу сохранять электростатический заряд. Из них делают сепараторы для аккумуляторов, во много раз повышающие срок службы аккумуляторов, сроки их хранения в заряженном состоянии.

Колпаки, саркофаг и покрывала. Если аэрозоли образуются в замкнутых объемах, внутри технологического оборудования, то и тогда их разрушение требует специальных сооружений и значительных затрат энергии. Между тем исследования показывают, что основная масса аэрозольных частиц, содержащихся в городской атмосфере, попадает туда не из дымовых труб. До 80%

аэрозольных выбросов в промышленности поступает из так называемых открытых источников: во время разлива металлов, выгрузки автоклавов, размола твердых материалов, транспортировки и выгрузки сыпучих веществ, сжигания в открытой атмосфере. Борьба с такими выбросами сложнее, чем с улавливанием аэрозолей из отходящих потоков, заключенных в газоходы. Выбросы открытых источников прежде всего надо собрать и только потом направить на пылеулавливающие устройства. Иногда, если в цехе много источников аэрозолей, весь воздух через вытяжную вентиляцию направляют на тканевый фильтр, скруббер или электро-фильтр. Но это требует больших затрат энергии, поскольку происходит сильное разбавление аэрозоля и основная часть энергии расходуется на перекачивание разбавляющего воздуха. Поэтому выгоднее сооружать вытяжные колпаки или защитные короба над отдельными источниками выбросов. Например, на новых заводах по выплавке алюминия в кожух, из которого откачивают выбросы, заключают электролизную ванну. Именно так пришлось поступить с разрушенным блоком Чернобыльской АЭС. Его заключили в герметичный саркофаг, куда подают воздух для отвода тепла, выделяющегося при делении радиоактивных осколков в развалинах реактора, а потом воздух прокачивают через фильтрующую станцию, улавливающую весь радиоактивный аэрозоль, выделяющийся из захоронения.

Наиболее прогрессивным методом подавления источников открытых выбросов считается сочетание вытяжных колпаков с воздушными завесами. Завесы отсекают аэрозоль от остальной части помещения и увлекают его воздушным потоком на очистные сооружения. Эффективно при этом улавливать аэрозоль скруббером с электрической зарядкой капель, занимающим мало места и обеспечивающим высокую эффективность.

Этот метод позволяет улавливать самые горячие выбросы.

Чтобы уменьшить затраты на улавливание открытых выбросов, необходима высокая культура производства. Например, образование аэрозолей при переплавке металлолома можно резко уменьшить предварительной очисткой лома. Использование печных дверей правильной конструкции может защитить атмосферу металлургических цехов от большей части аэрозольных выбросов из печей.

Загрязняет атмосферу также пыль с открытых поверхностей. Во многих городах до 90% аэрозольных частиц состоит из минеральных составляющих земной коры. Основную их часть ветер приносит с полей и грунтовых дорог, сдувает с городских улиц. Улавливать выбросы из открытых источников можно. Однако подходящие технические решения здесь найдены далеко не для всех случаев — слишком большими оказываются площади источников пыли. Хорошо, когда часто идут дожди. Даже средний дождичек с выпадением около 10 мм воды смывает в канализацию около половины пыли, а сильный ливень может смыть до 90%. Когда дождей нет, с пылью борются машины для уборки улиц. Больше пользы приносят машины, смывающие грязь в канализацию. Разрабатываются новые типы машин, собирающих пыль. Польза от моечных машин снижается в сухом климате, когда смоченное дорожное покрытие быстро высыхает и начинает снова пылить. Проще всего увлажнять дороги, но даже при добавлении к воде поверхностно-активных веществ, способствующих образованию корочки на поверхности, смачивание поверхности надо повторять 3—5 раз в неделю. Можно покрывать дороги нефтью, но это снижает безопасность движения и способствует загрязнению нефтью окружающей среды, а помогает нефть от пыли всего на месяц. За рубежом созданы специальные

дорожные покрывала, не пропускающие пыль с поверхности дороги в атмосферу.

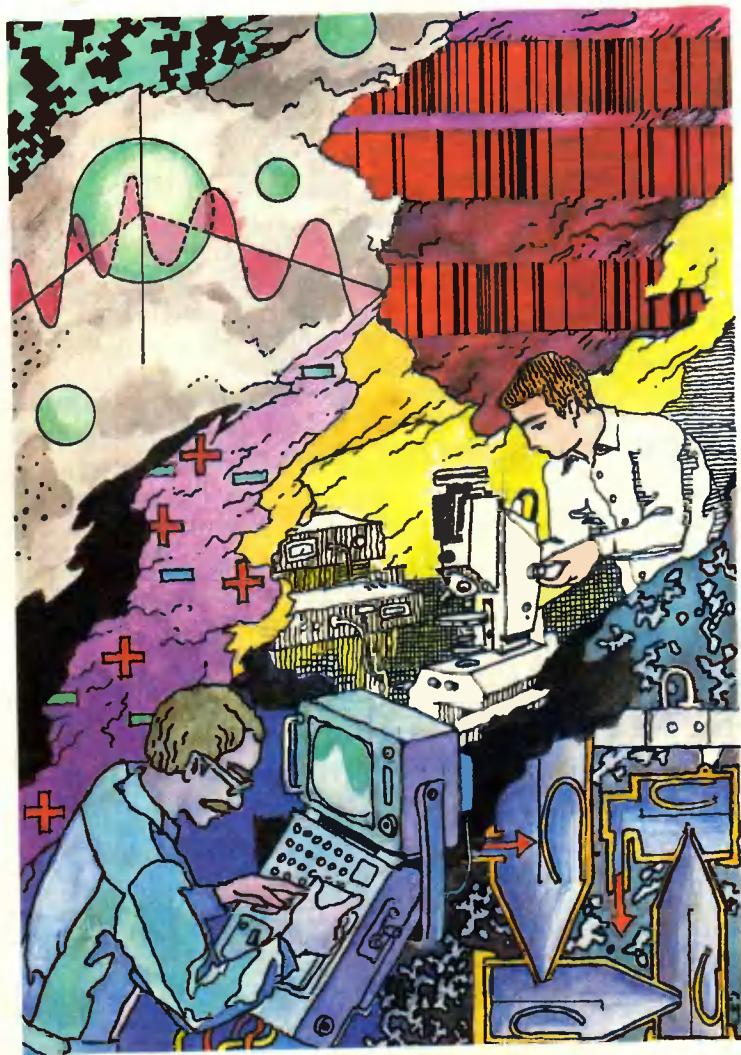
Для уменьшения пыления с куч сыпучих материалов применяют покрывала, загораживают кучи щитами, опрыскивают липкими пленкообразующими веществами. На отвалах лучше всего создавать слой растительности, но не на всяком отвале растет трава.

Серьезную проблему представляет пыление при сельскохозяйственных работах в сухую погоду. Почва обычно содержит значительные количества ядохимикатов, которые уносятся с частицами пыли. Из-за больших размеров сельскохозяйственных угодий трудно применять искусственное увлажнение почвы при вспашке. О возможности пылевого уноса ядохимикатов из почвы надо помнить при разработке новых способов защиты растений от вредителей.

Как исследуют аэрозоли

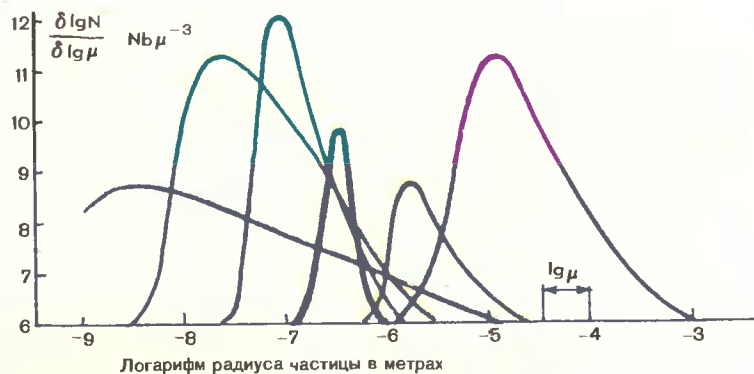
Метод измерения всегда базируется на оценке какого-либо свойства объекта. Методы исследования аэрозолей — это исследование во взвешенном состоянии, изучение свойств по скорости осаждения и изучение осадка аэрозольных частиц.

Что быстрее осаждается — карлики или гиганты? Так как мы знаем законы, связывающие скорость движения частиц под действием известной силы, то по скорости осаждения частиц можно определить размер. Но для частиц неправильной формы так можно определить аэродинамический, или стоксовый, размер. Как заставить частицы осаждаться? С помощью сил гравитации (седиментирования) в спокойной среде, где нет конвективных потоков. Особенно удобно наблюдать седиментацию в темнопольном микроскопе. Если сделать освещение прерывистым (стробированным), то траектория падающих частиц на фотопленке будет выглядеть це-



почкой точек, расстояние между которыми определяет скорость седиментации по формуле Стокса (при необходимости с различными поправками). Седиментационный ультрамикроскоп, подобно камере Вильсона, сыграл большую роль в развитии физики. Американский физик Дж. Милликен поместил в герметизированный объем (кювету) пластины электрического конденсатора. Он наблюдал за поведением в этом микроскопе только заряженных капелек — определенная часть аэрозольных частиц всегда заряжена благодаря наличию в воздухе ионов, образованных фоном ионизирующих излучений. Милликен определил размер частиц по скорости падения, а затем уравновешивал силу тяжести, подавая разность потенциалов на пластины конденсатора, и заставлял капельки повиснуть. Зная, что сила, действующая на частицы равна, с одной стороны произведению известной напряженности поля на величину электрического заряда, а с другой — уже найденной силе тяжести, Милликен находил величину заряда частиц, и она всегда оказывалась кратной минимальному заряду. Так был определен заряд электрона.

В седиментационном микроскопе нельзя измерить размер частиц радиусом менее $0,25 \text{ мкм}$ — они практически не падают, а падение крупных частиц искажено броуновским движением. Для более мелких частиц Н. А. Фукс и И. В. Петрянов применили осцилляционный микроскоп. Как и в приборе Милликена, в нем есть пластины конденсатора, но силовые линии электрического поля направлены не вертикально, а горизонтально, полярность пластин периодически переключается. В результате траектории частиц имеют вид зигзагов. Этот прибор позволяет одновременно измерять и заряд и размер частиц, погрешность его измерений, обусловленная броуновским движением, много меньше, чем в седиментационном микроскопе, поскольку



Функция распределения
аэрозольных частиц
по размерам

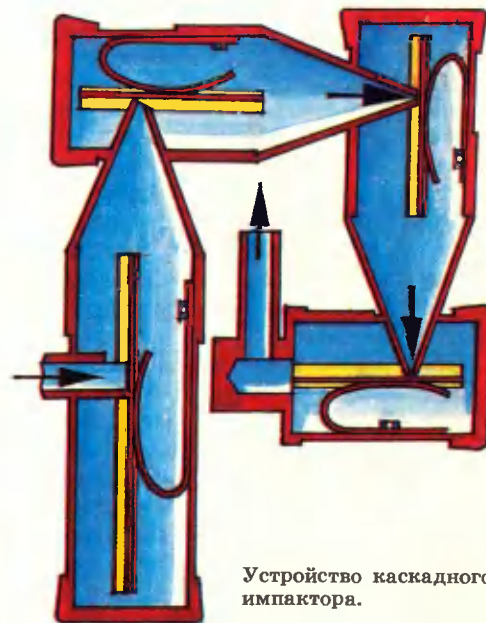
(размерности даны в
логарифмическом
масштабе).

ку увеличением напряженности поля можно сделать скорость направленного смещения частиц как угодно большей скорости броуновского смещения.

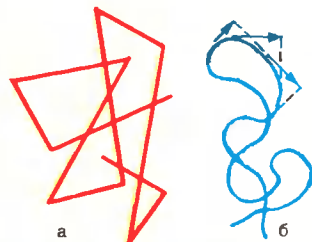
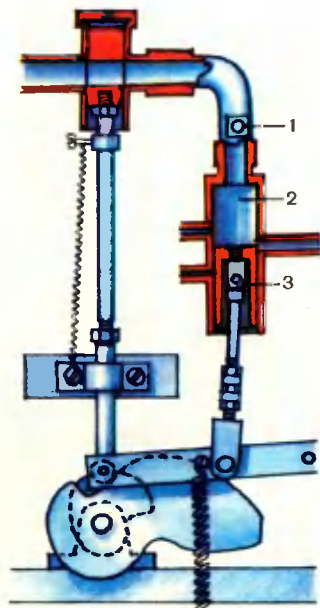
Примером автоматических приборов для измерения концентрации и функции распределения частиц по размерам и скорости осаждения могут служить электрогранулометры. В этих приборах аэрозоль сначала подвергают электрической зарядке, а затем выпускают в виде тонкой струйки поток,двигающийся между электродами, коаксиального конденсатора, состоящего из нескольких секций. Поскольку скорость движения частиц зависит от заряда и размера, частицы с различным зарядом и размером попадают в секции конденсатора. По измерениям тока различных секций на основании знаний законов зарядки и движения частиц находят функцию распределения по размерам, а по величине тока и скорости подачи аэрозоля — концентрацию частиц. Такие приборы позволяют определить размер частиц в интервале 0,005—5 мкм.

Для осаждения и классификации частиц можно использовать силы инерции, крупные частицы осаждаются легче, мелкие — труднее. Существует много приборов для инерционной классификации частиц, используются они обычно для частиц крупнее 0,05 мкм. Наиболее распространенным из них является каскадный импактор (см. рис. на с. 85). В импакторе поток аэрозоля просасывается последовательно через все более сужающиеся сопла. Против каждого сопла расположена пластинка, покрытая липким веществом, чтобы предупредить отскок аэрозольных частиц. Истекающий из сопла поток изгибается в процессе обтекания пластинки, а аэрозольные частицы под действием сил инерции сходят с линии тока газа и ударяются о пластинку. Чем тоньше сопло, тем меньше частицы захватываются пластинкой, на первой ступени каскада оседают крупные частицы, потом все более мелкие. О концентрации аэрозоля судят по количеству осадка в импакторе, о функции распределения — по соотношению количества осадка на разных ступенях.

Импактор позволяет представить дисперсный со-



Устройство каскадного импактора.



Траектории газовых молекул (а) и частиц (б), подверженных броуновскому движению.

Устройство камеры Вильсона для счета высокодисперсных аэрозольных частиц:
1 — ультрамикроскопическая ячейка;
2 — рабочая камера; 3 — поршень.

став аэрозоля в виде набора четырех—восьми фракций. Если нужна более подробная информация, то можно использовать спиральную центрифугу. Аэрозоль пропускается по спиральному каналу плоского сечения в теле массивного вращающегося цилиндра. Под действием центробежной силы частицы осаждаются на уложенную вдоль внешней стенки канала ленту общей длиной 2 м. В начале канала — у оси цилиндра — осаждаются самые крупные частицы, радиусом около 10 мкм, на периферии — мелкие, до 0,05 мкм. Распределение плотности осадка вдоль ленты дает функцию распределения по аэродинамическим размерам.

Все инерционные приборы требуют предварительной калибровки по монодисперсным аэрозольям с частица-

ми неизвестного размера, так как теоретический расчет инерционного осаждения очень сложен.

До сих пор мы говорили об относительно крупных частицах. А как изменить размер самых маленьких кластеров? Ведь они не седиментируют и практически не подвержены силам инерции. Вспомним, что мелкие частицы обладают наибольшей способностью к броуновскому движению, а значит, и к осаждению путем диффузии. За счет диффузии карлики осаждаются куда быстрее великанов. Можно оценить размер по интенсивности броуновского движения, наблюдая его в ультрамикроскопе. Но возможности этого метода ограничены — мелкие частицы слишком слабо рассеивают свет, чтобы их можно было наблюдать, необходимо использовать мощный луч света, который вызывает нагрев и конвекцию, фотофоретическое смещение частиц. Поэтому для измерения скорости диффузного осаждения высокодисперсных частиц прибегают к другому приему. Поток аэрозолей пропускают через канал известной геометрии (круглую трубку или плоскую щель) и измеряют, насколько уменьшится концентрация частиц при прохождении канала известной длины с данной скоростью. А потом сравнивают с результатами расчетов для аэрозолей различного диаметра. Измеряя осаждения в трубках различной длины, можно получить функцию распределения полидисперсного аэрозоля. Этот метод применим к самым маленьким кластерам — если они только прилипают к стенкам при каждом столкновении. Изобретатель этого метода шведский ученый Таунсенд использовал его, чтобы измерить подвижность газовых ионов. А советские ученые с успехом определили этим методом коэффициенты диффузии отдельных атомов изотопов свинца. А как измерить изменение концентрации кластеров до и после пропускания их через осадительный канал? Ведь большая часть диапазона размеров кластеров

лежит ниже размера мельчайших аэрозолей их вирусов. Для этой цели служит созданный советским ученым Я. И. Коганом прибор, сокращенно именуемый КУСТ — конденсационный укрупнитель стандартного тумана. Этот прибор использует свойство кластеров служить ядрами конденсации. Холодный поток кластеров смешивается с горячим потоком, содержащим пары конденсирующейся жидкости в смесителе специально подобранной геометрии. Оказывается, что в определенных условиях можно добиться того, чтобы все кластеры вырастали до капелек определенного размера, независимо от концентрации. Тогда способность укрупнения аэрозоля рассеивать свет оказывается прямо пропорциональной счетной концентрации. Простое измерение интенсивности светорассеяния от аэрозоля, прошедшего и не прошедшего канал, дает степень осаждения.

Прибор КУСТ можно использовать для укрупнения до регистрируемого оптическим счетчиком размера даже отдельных молекул некоторых веществ, в этом случае приходится подбирать вещество, которое охотно конденсируется на молекулах искомой примеси, но не на молекулах компонентов воздуха и других примесей. По этому принципу можно построить аппарат искусственного обоняния, обнаруживающий 1 молекулу в 1 см^3 , т. е. на много превышающий по своим возможностям обоняние животных.

Массу самых малых кластеров, содержащих до тысячи молекул, определяют с помощью масс-спектрометров, т. е. по величине отклонения траекторий ускоренных заряженных кластеров в электромагнитном поле при полете в вакууме.

Фотоны считают пылинки. Главным достоинством методов изучения аэрозолей во взвешенном состоянии является то, что они не разрушают аэрозоль. А как можно изучать такой хрупкий объект, состоящий из мельчай-

ших частиц, не изменив его микроструктуры? Конечно, с помощью электромагнитных излучений, достаточно слабых, чтобы не испарить частицы.

Различают микроскопические методы исследования, в которых излучение взаимодействует со статически большим ансамблем аэрозольных частиц, и методы счета индивидуальных частиц.

Простейшими оптическими приборами для исследования аэрозолей являются турбидиметры и нефелометры. В первых измеряется ослабление параллельного потока лучей света (коллимированного пучка), а во вторых — степень рассеяния этого пучка под углом. Если поток света пересекается аэрозолем из одного и того же вещества с одной и той же дисперсностью, то интенсивность ослабления света в турбидиметре или света в нефелометре будет прямо пропорциональна концентрации аэрозоля. Это удобно для контроля содержания аэрозолей в технологических потоках, для испытания аэрозольных фильтров. В полидисперсных аэрозолях при осаждении изменяется дисперсный состав, поэтому нарушается пропорциональность между светорассеянием и концентрацией.

Определить размер частиц можно, измеряя угловое распределение интенсивности рассеяния (индикатрису), излучение определенной длины волны. Если известен коэффициент преломления вещества, то результат измерений можно сравнить с расчетными и подобрать параметры распределения по размерам, обеспечивающим наилучшее совпадение расчетов и экспериментов. Для аэрозоля с узким распределением по размерам задача решается проще. Можно осветить аэрозоль пучком белого света и, рассматривая его под разными углами, найти число красных полос. В диапазоне радиусов $0,1\text{--}10 \text{ мкм}$ число полос примерно равно среднему оптическому радиусу, выраженному в десятых долях микрона. Более точно найти значе-

ние радиуса можно, измерив угловые положения линий.

Можно измерить спектры прозрачности аэрозоля, т. е. степень их ослабления излучения в функции длины волны. Если коэффициент преломления аэрозоля мало меняется с длиной волны, то этот метод дает возможность определить параметры его распределения по размерам.

В последнее время получили развитие лидарные методы дистанционного зондирования аэрозолем. Лидаром называется лазерный локатор, состоящий из лазера и приемника, определяющего амплитуду и временную структуру отраженного аэрозолем импульса, а при необходимости изменение состояния поляризации, сдвиг частоты измерения. Такие приборы также позволяют получить информацию о размере частиц и их концентрации, но задача расшифровки данных измерений очень сложна, ведь используются они чаще всего для зондирования аэрозолей неизвестной природы, для которых нет коэффициента преломления. Однако лидары уже находят применение для контроля за выбросами загрязнений в атмосферу. С одной точки с помощью лидара можно контролировать выбросы в промышленной зоне площадью в несколько десятков квадратных километров. При светорассеянии часть светового потока рассеивается неупруго, имеет место так называемое комбинационное рассеяние (эффект Рамана), вследствие чего в спектре отраженного аэрозолем лазерного излучения появляются новые полосы. По этим полосам можно судить о химической природе аэрозолей промышленных выбросов, а в случае войны вовремя обнаружить химическое или биологическое нападение с помощью распыленных врагом аэрозолей.

Коль скоро мы хорошо знаем законы светорассеяния только на сферических частицах, макрооптиче-

ские методы дают не истинные размеры частиц, а эквивалентные оптические. Обнаружить этими методами присутствие несферических частиц и сделать вывод об их форме (сплюснутая или вытянутая) можно, изучая изменение поляризационного состояния излучения при рассеянии. Изучение изменения состояния поляризации необходимо, когда мы имеем дело с аэрозолями неизвестного происхождения, например в атмосферах других планет.

Макроскопические методы применимы для исследования аэрозолей с частицами, размер которых сравним с длиной волны излучения. В полидисперсных аэрозолях светорассеяние определяется самой грубой фракцией, которая «забывает» тонкие световые и поляризационные эффекты рассеяния на более мелких частицах. Впрочем, существует один макрооптический метод, применимый, наоборот, к частицам, размер которых на порядок больше длины волны, — так называемый малоугловой метод, основанный на измерении индикатрисы рассеяния под очень малыми — не более 5° — углами. Этот метод можно применять и для исследования кластеров, если использовать не световое, а рентгеновское излучение. В 50-х гг. появились фотоэлектрические счетчики, позволяющие считать и измерять размер отдельных аэрозольных частиц. Это темнопольные ультрамикроскопы с фотоэлектрической регистрацией частиц. В отличие от седиментационных ультрамикроскопов в счетчиках поток частиц непрерывно движется через исследуемый объем, причем этот объем должен быть маленьким, а аэрозоль — разбавленным, чтобы одновременно в чувствительном объеме находилось не более одной частицы.

Фотоэлектрические счетчики — чрезвычайно удобные приборы. Современная техника позволит их делать достаточно миниатюрными, чтобы их можно было размещать на борту межпланетных станций.

Существуют счетчики взвешенных частиц, которые отрабатывают изображение сразу многих частиц, так называемые телевизионные счетчики. В этих приборах аэрозоль рассматривают через микроскоп. Электронный луч, сканируя телевизионное изображение, способен запомнить, сколько раз он пересек изображение каждой частицы, т. е. сколько строк телевизионной разверстки занимает каждая частица. Если частицы достаточно велики, — скажем, более 2—3 мкм, то таким образом можно классифицировать их по размеру. Для измерения частиц этого же диапазона размеров применяется и голография, способ получения объемного изображения с помощью интерференции лазерного луча, особенно когда необходимо изучать быстротекающие процессы, например распыленные жидкости.

Отбор и фильтры

Измерение скорости осаждения дает аэродинамический размер частиц, исследование во взвешенном состоянии — оптический размер, или сечение захвата ионов. Но для многих целей, например при оценке вредного воздействия на организм, необходимо знать массовую концентрацию, а также распределение частиц по массам, иметь информацию о форме и структуре частиц. Поскольку пересчет с оптических и аэродинамических размеров для частиц сложной формы и неизвестного состава невозможен, приходится прибегать к определению веса осадка аэрозоля, содержавшегося в известном объеме воздуха. Отбор осадка позволяет исследовать и химический состав аэрозоля, а если отбор производится по фракциям (например, с помощью импактора) — то и фракционный химический состав (относительное содержание различных веществ в исходной фракции аэрозоля). Это особенно полезно, когда следует установить источники поступления в атмосфе-

ру того или иного химического элемента.

Наиболее простой и надежный способ количественного осаждения аэрозолей — пропускание их через абсолютные фильтры, задерживающие частицы всех размеров. Чаще всего для этого применяются фильтры из ультратонких полимерных волокон — ФП. Количество аэрозольного вещества на фильтре можно определить различными способами. Если концентрация частиц не слишком мала, скажем более 1 мг/м², то фильтры с осадком можно просто взвесить. Частицы радиоактивных аэрозолей — даже одиночные — можно сосчитать, приложив фильтр к фотопластинке и проявив засвеченные излучением места, а можно и просто измерить радиоактивность фильтра. Осадки частиц с фильтра растворяют (а если нужно, то потом высушивают) и подвергают химическому анализу, используя любые современные методы, такие, как нейтронноактивационный анализ, атомно-абсорбционная спектрометрия, рентгенофлуоресцентные методы.

Аналитические фильтры используются и для фракционного отбора. Можно сделать такие аналитические фильтры, которые будут улавливать только крупные частицы, а можно и наоборот, только мелкие. Слой фильтрующего материала надо брать тонкий, иначе фильтр уловит все частицы (правда, всегда будет существовать неоднородное распределение осадка на толщине фильтра). Если сделать многослойный фильтр из волокон различной толщины и плотности упаковки, то можно добиться того, что в каждом слое будет собираться своя фракция. Этот метод был предложен советским исследователем Б. И. Огородниковым. Он с успехом применяется для отбора из атмосферы радиоактивных аэрозолей и позволяет вскрывать их источники.

Кроме фильтров для отбора проб аэрозолей можно использовать и порционные и центробежные осадители

(импакторы, центрифуги, в которых частицы осаждаются из закрученного потока за счет центробежной силы), а также электрические силы и термофорез. Электропреципитатор представляет собой заземленную металлическую трубку, по оси которой натянута изолированная от стенок проволока. Если подать на проволоку высокое напряжение, то вокруг нее возникнет светящаяся корона — область лавинной ионизации газа. При пропускании по трубке аэрозольного потока частицы будут захватывать газовые ионы и увлекаться электрическим полем к стенке. В термопреципитаторе небольшой поток аэрозоля ($1 \text{ см}^3/\text{с}$) пропускается через зазор между двумя холодными металлическими пластинами, на одной из которых подложка для сбора пробы частиц. В середине зазора помещается нагреваемая проволока или нить. Под действием градиента температуры частицы осаждаются на подложку.

Осадки аэрозольных частиц можно исследовать с помощью оптических и электронных микроскопов, причем часто применяется телевизионная обработка изображения осадка. Если определить средний размер частиц осадка и массовую концентрацию, то делением массы на средний массовый размер находят ориентировочное значение счетной концентрации. Самое важное при отборе проб аэрозолей — обеспечить их представительность.

Рассмотрим, что происходит при входе аэрозоля в трубку, расположенную отверстием навстречу потоку. Если скорость забора потока аэрозоля больше скорости до среза трубки, то линии тока газа загнутся к оси трубки, искривятся. При этом силы инерции уведут часть аэрозольных частиц с линии тока и они не попадут в пробоотборники. Чем крупнее частицы, тем меньше их попадет в трубку, тем сильнее исказится спектр размеров более грубой фракции аэрозоля. Если же скорость отбора меньше скорости потока, то отобран-

ный аэрозоль, наоборот, переобогатится крупными частицами. Чтобы избежать искажений, отбор ведут изотинетически, т. е. со скоростью, равной скорости возмущенного потока, пробоотборник делают в виде тонкостенной трубки с острой кромкой (так меньше искажаются линии тока) и располагают строго навстречу потоку.

Астрозоли — среда обитания небесных тел

В настоящее время большинство ученых сходятся на том, что процесс возникновения Вселенной начался взрывом некоего первичного ядра. Никто точно не знает, как протекали на ранних стадиях взрывы, что представляли собой продукты этого взрыва. Но ясно, что через некоторое время, когда Вселенная немного остыла, образовались элементарные частицы, потом атомные ядра, потом нейтральные атомы, а когда температура стала совсем низкой — порядка тысяч градусов, стало возможно образование молекул. Но как же образовались небесные тела — звезды, планеты, астероиды, кометы? Все специалисты сходятся на том, что холодные тела (планеты, астероиды, кометы) возникли путем конденсации межзвездного газа, а многие считают, что так образовались и звезды.

Конденсация — это последовательная агломерация во все более крупные образования — сначала кластеры, потом микроскопические пылинки, затем микроскопические тела. Последнюю стадию правильнее назвать коагуляцией, да и то не всегда. Ведь небесные тела продолжают расти и в наши дни путем захвата межпланетной пыли и метеоров, но этот процесс коагуляцией астрономы не называют.

Таким образом, облака пыли в космическом пространстве — астрозоли — являются предшественниками возникновения небесных тел и средой, в которой эти



тела продолжают путь. Как же могли возникнуть первые пылинки астрозолей? Можно ли рассматривать межзвездный газ как пересыщенный пар, применимы ли представления о нуклеации к зарождению межзвездных пылинок? Нет. Прежде всего, межзвездный газ состоит из веществ с совершенно различными свойствами, отличается и термодинамическое состояние этих веществ. Основной компонент межзвездной среды — водород, вещество с температурой испарения при атмосферном давлении — 21°К . А в межзвездном пространстве водорода — 1 молекула на 10^5 м^3 , что при температуре 20°К соответствует давлению $\sim 10^{-24}$ Па, т. е. совершенно ничтожному. О гомогенной конденсации межзвездного водорода говорить не приходится. Но в космосе есть и другие химические элементы, с которыми водород способен давать химические соединения, — кислород, азот, углерод. При столкновении с атомами этих элементов могут образоваться сначала радикалы, а потом и нейтральные молекулы воды, аммиака, формальдегида и более сложные соединения. Эти молекулы уже способны в принципе к конденсации, поскольку энергия их теплового движения много меньше энергии межмолекулярного взаимодействия. То же самое можно сказать об атомах более тяжелых элементов — железа, никеля, из которых образовались метеориты. В пространстве такие атомы представляют собой очень разреженный, но сильно пересыщенный пар. Конденсация при больших пересыщениях уже не требует флуктуационного рождения критического зародыша, потому что уже объединение двух молекул — димер — является устойчивым и может расти путем присоединения последующих столкновений. Конечно, межзвездная среда очень разрежена, и столкновение между молекулами, необходимое для их объединения, происходит редко — в среднем одно на 1 км^3 за 10 лет, но по астрономическим масштабам это небольшой проме-

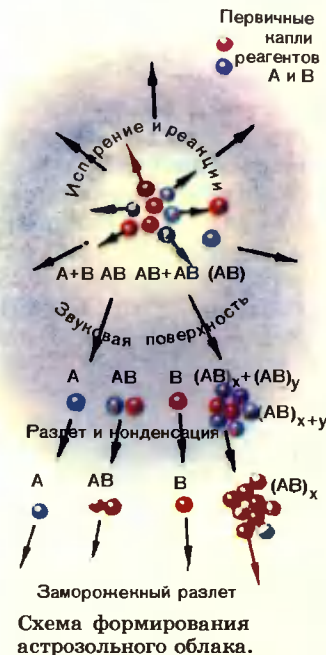
жуток времени, а за время, прошедшее с момента первого взрыва, небесные тела могли бы успеть сформироваться. Но есть одно существенное обстоятельство. Законы механики не позволяют двум столкнувшимся телам образовать димер-связанное состояние. Чтобы понять, в чем тут дело, надо взглянуть на рис. на с. 00, на котором показана динамика движения двух притягивающихся тел. Для удобства начало координат помещено в центр тела А. Под действием сил притяжения траектория тела В закручивается вокруг центра первого тела, а это значит, что появляется центробежная сила, которую нужно вычесть из силы притяжения. Показана зависимость энергии взаимодействия двух молекул в зависимости от расстояния между ними. Если бы центробежной силы не было, энергия второй частицы относительно первой плавно становилась бы на близких расстояниях отрицательной, энергия частицы В провалилась бы в «потенциальную яму», что и означало бы образование димера. Но из-за центробежной силы на потенциальной кривой появляется горб — «ротационный барьер», преодолеть который частица, в соответствии с законами классической механики, не может. Правда, при низких температурах космического пространства в поведении молекул начинают проявляться волновые свойства. Их можно рассматривать не только как частицу, но и как волну, длина которой выражается соотношением Де Бройля:

$$l = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k T}}$$

где h — постоянная Планка, m — масса молекулы. Если толщина ротационного барьера сравнима с l , то есть вероятность, что частица просочится под барьером — это так называемый туннельный эффект — и окажется в заштрихованной области на рисунке. Но это не будет означать образование димера, молекулы будут

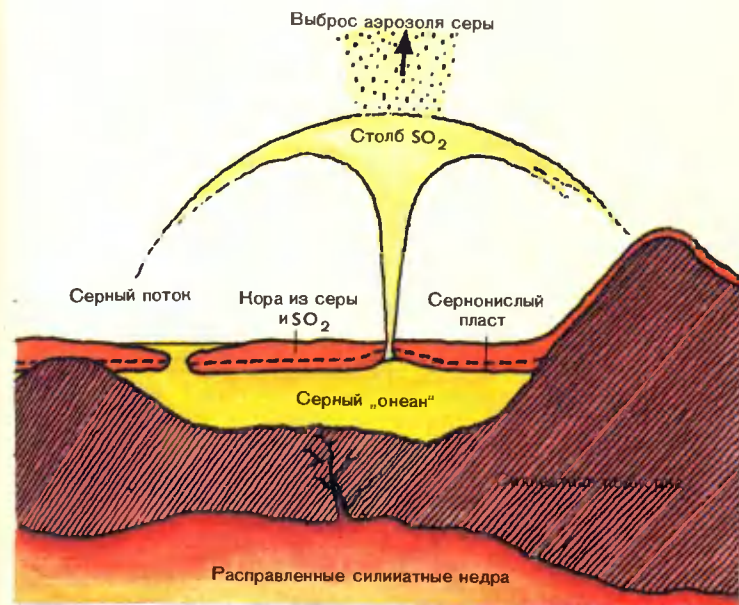
связаны неустойчиво (метастабильно), и их связь будет распадаться за счет того же туннелирования. Чтобы могло образоваться связанное состояние (причем не обязательно с участием туннелирования), необходимо, чтобы в столкновении приняли участие не две, а три молекулы. Третья молекула должна унести избыток энергии относительного движения первых двух молекул. Но столкновение трех молекул в одной точке межзвездного пространства совершенно невероятно даже за астрономические промежутки времени, и это делает нереальным весь процесс образования астрозоля, а следовательно, и небесных тел.

Однако они должны были как-то образоваться! Есть некоторые облегчающие обстоятельства. Во-первых, тройные столкновения нужны только для образования лишь самых малых кластеров, содержащих две-три, ну, может быть, пять-шесть молекул. Кластеры большого размера нельзя рассматривать как абсолютно твердые тела, у них есть внутренние степени свободы, которые могут поглотить кинетическую энергию относительного движения, подобно тому как мягкие предметы поглощают энергию падающего на них упругого тела, скажем мяча. Мяч не будет подпрыгивать на матрасе. Вероятнее всего, метастабильно связанные состояния существ-



вуют достаточно долго, чтобы столкновение с третьей молекулой успело произойти. Но до конца этот вопрос не выяснен.

Хотя с механизмом образования астрозолей не все ясно, в космосе находится огромное количество астрозольных пылинок, и роль их в жизни Вселенной велика. Все химические реакции в космосе протекают на этих частицах — в свободном пространстве они невозможны по все той же причине необходимости участия третьей молекулы в элементарном акте реакции. Присутствие частиц облегчает дело. Молекулы вещества при столкновении с пылинкой поглощаются на нее и могут находиться там сколь угодно долго. Потом сорбируются молекулы других веществ и в поглощенном состоянии, особенно под действием излучений, могут проходить какие угодно реакции. В последнее время высказывается мысль, что в космосе могла зародиться если не жизнь, то, по крайней мере, предшествующие и необходимые для возникновения жизни аминокислоты, из которых уже в атмосферах планет возникло белковое вещество. Источником астрозольных частиц явилась не только конденсация — коагуляция первичного протозвездного или протопланетного газа. Они непрерывно возникают и в наше время. Гигантские облака мельчайших частиц сажи периодически извергают из своих недр так называемые коптящие звезды типа RCB, примером которых является звезда R созвездия Северной Короны. Светимость этой звезды при извержении сажевого астрозоля уменьшается в десятки раз. Вообще, участие ядер атомов углерода в процессе термоядерного синтеза, протекающего в звездах, известно. Известно, что звезды содержат углерод. Но, почему только в «коптящих» звездах существуют условия для конденсации углерода в сажевых частицах, остается загадкой. Впрочем, и Солнце окружено диском астрозольных пылинок в два-три его диаметра,



Возможная модель
образования
астрозольного облака

вокруг Юпитера. Выброс
серы с поверхности
спутника Ио.

находящимся на таком же расстоянии. Так что, может быть, генерация астрозолей — универсальные свойства звезд. Надо отметить, что сила гравитации звезды, хотя она в десятки раз больше, чем планетное притяжение, не способна удержать эти частицы — сила светового давления, а в атмосфере звезды — и фотофорез намного превышают гравитацию.

Генерируют аэрозоли и некоторые холодные тела. Например, вулканы спутника Юпитера Ио выбрасывают пары серы и ее соединений, которые конденсируются в аэрозоль, увлекаемый притяжением Юпитера. Ио —

ближайший к Юпитеру спутник. В результате вокруг Юпитера существует кольцо серного астрозоля.

Астрозоли присутствуют и в кольцах Сатурна и Урана, которые имеют сложную, переплетенную структуру. Возможно, образование этой структуры объясняется сложностью траекторий частиц при одновременном воздействии на заряженные частицы света и электромагнитного поля планеты. В земных условиях можно наблюдать самые замысловатые траектории частиц при магнитофотофореze.

Грандиозен масштаб формирования астрозолей при приближении к Солнцу комет. Предполагается, что комета — это небесное тело, состоящее из легкоиспаряющихся веществ, наподобие льда, твердых аммиака и углекислоты. Можно отметить, что в такой системе должны существовать и более сложные соединения — карбонат и бикарбонат аммония. По изучению спектров веществ, выделяющихся при испарении, сделан вывод о присутствии в кометах и других летучих и диссоциирующих соединений. Кроме того, ядро кометы содержит в виде вкраплений пылинки нелетучих веществ. Солнце, а вероятно, и другие звезды окружены гигантскими облаками комет. Так называемое облако Оорта, окружающее Солнце, содержит 10^{15} комет и простирается почти до половины расстояния до ближайшей звезды — α -Центавра. Миллионы лет кружатся кометы в холодном пространстве вдали от Солнца. Но иногда какие-нибудь из них могут пройти близко от орбиты одной из внешних планет, ее траектория изменится, и комета устремится к Солнцу. По мере приближения к звезде под действием солнечного излучения ядро кометы начинает испаряться, вокруг него формируется газовая оболочка — кома. Солнечный ветер «сдувает» поток газа, и продукты испарения вытягиваются в сторону от Солнца, образуя хвост. Формы кометных хвостов весьма разнообразны. Если комета содержит только

легкоиспаряющиеся вещества, то хвост представляет собой газовый шлейф и имеет относительно простую форму. Но, если в ядре кометы вкраплены некоторые частицы, они высвобождаются при испарении ядра, увлекаются газообразными продуктами испарения и хвост становится газопылевым. Если ядро кометы содержит легко разлагающиеся соли карбоната, цианида аммония, то в продуктах испарения будут содержаться аммиак, вода, CO_2 , HCN и различные ионы и радикалы, образующиеся при диссоциации этих веществ. При разлете в пустоту эти продукты охлаждаются, могут вступать в обратные химические реакции с образованием конденсирующихся продуктов — карбонатов, цианидов. При конденсации этих веществ образуются астрозольные частицы. Ионы, нейтральные газовые молекулы, крупные пылевые частицы, дисперсные продукты конденсации обладают различными закономерностями при разлете в вакуум и при взаимодействии с солнечным светом и электромагнитным полем. Поэтому газоастрозольные хвосты могут приобретать самую разнообразную форму, становиться двойными, тройными. Изредка бывают даже хвосты, вытянутые в сторону Солнца. Здесь уместно вспомнить, что фотофорез бывает как положительным, так и отрицательным.

Кометные хвосты вытягиваются на многие миллионы километров, поэтому велика вероятность, что через кометный хвост рано или поздно пройдет какая-либо планета, как прошла в 1913 г. Земля через хвост кометы Галлея. Таким образом, кометы являются переносчиками межзвездного вещества к планетам.

Мы уже говорили, что не исключена возможность, что жизнь зародилась именно на астрозольных частицах. Но как жизнь может распространиться по Вселенной? Вспомним, что даже на далекой окраине Галактики, где живем мы, где звезды далеки друг от друга, кометные облака соседних звезд могут перекрываться.

В своем бесконечном движении вдали от Солнца комета собирает астрозольные пылинки, на которых могут быть зародыши будущей жизни, а затем она может занести их в пространство, где вращаются пригодные для дальнейшей эволюции жизни планеты. Исторгнутое кометным ядром вещество рассеется в пространстве, достигнет кометного облака соседней звезды, где кометы соберут вещество, а потом принесут его к соседней звезде.

Еще более реальной может оказаться роль комет как переносчиков биологического вещества в так называемой гипотезе о панспермии, т. е. о сознательном распространении живой материи по Вселенной из одного источника. Эта гипотеза исходит из того, что вероятность возникновения жизни ничтожно мала. Ожидать, что условия для возникновения жизни будут иметь место не в одном, а в нескольких уголках Галактики, очень трудно, и возникшая где бы то ни было цивилизация обязательно это знает. Тогда она поймет, что надо принять сознательные шаги к распространению жизни во Вселенной. А как это сделать? И здесь очень удобным инструментом может оказаться искусственная комета. Можно вморозить мельчайшие частицы живого вещества, — скажем, споры бактерий и каким-то образом консервированные микрогранулы живого белка и живой дезоксирибонуклеиновой кислоты — в сублимирующее под действием тепла звезды вещество (лед, твердая углекислота, бикарбонат аммония). Изготовить из этой субстанции искусственное кометное ядро, а потом отправить его к любой звезде на выбор. Но почему имеет смысл транспортировать вещество именно в виде искусственной планеты? Дело в том, что нацелить искусственное тело или космический корабль на звезду сравнительно просто. Но как обеспечить попадание биологического вещества в атмосферы планет, если неизвестны параметры орбит планет, и, вообще, сколько этих

планет, и на какой из них есть пригодные для жизни условия? Надо обеспечить корабль автоматическими системами поиска планет, системами автоматического подвода корабля к планете и перехода к следующей. Это слишком сложно. Комета же создает хвосты огромной протяженности, через которые рано или поздно пройдут все планеты.

Астрозоли могут иметь и антропогенную природу. Один из источников — конденсация продуктов сгорания топлива в двигателях космических аппаратов. Кроме того, частицы непрерывно генерируются поверхностями аппаратов под действием факторов космического пространства. Развитие космической технологии также должно привести к появлению новых источников астрозолей. Такие процессы, как плавка, сварка, резка металлов в космическом пространстве, выращивание кристаллов, связаны с нагревом материалов, а следовательно, с последующим образованием космических частиц.

Астрозоли, образующиеся в качестве побочного продукта функционирования космических аппаратов, могут доставлять большие неприятности. Осаждение астронавических частиц на бортовые элементы космических аппаратов может приводить к нарушению их нормальной работы. Могут загрязнять иллюминаторы, объективы аппаратуры для космического фотографирования, поверхность солнечных батарей, замыкать антенны радиотехнических устройств. Космические аппараты очень чувствительны к поддержанию радиационного баланса, этим определяется интервал температур, в котором способны работать люди и приборы. Для обеспечения правильности соотношения между отражением и поглощением потока внешнего излучения, а также собственным тепловым излучением аппарата на его поверхность наносятся специальные покрытия. Осаждение частиц на эти покрытия искажает их отражатель-

ные и излучательные свойства, что повлечет за собой нарушение термического режима аппарата.

По этим причинам развитие космической техники должно сопровождаться мерами по контролю за нежелательным загрязнением космического пространства астрозольными частицами.

Мы рассказывали о климатических катастрофах, которые могут происходить, когда в атмосферу выбрасывается большое количество аэрозоля. А могут ли аналогичное действие оказывать астрозоли?

Оказывается, что на протяжении 600 млн. лет — так называемого фанерозоя, или периода «явной жизни» на Земле, климат был намного теплее, чем сейчас, и тропики доходили почти до Полярного круга. Но около 17 млн. лет назад началось постепенное понижение температуры. Сформировались полярные льды. Конечно, похолодание не было равномерным. То значительная часть суши в умеренных широтах покрывалась льдом, то льды отступали и устанавливался более теплый климат, такой, как сейчас. Но если построить температуру в функции времени и взять достаточно большой масштаб, — скажем, 10 млн. лет в 1 см, то будет видно, что последние 15 млн. лет средняя температура на Земле падала.

Причины периодических изменений климата известны — это изменения солнечной активности, изменения параметров орбиты Земли. Эти причины вызывают колебания средней температуры на $2\text{—}3^\circ$. По сравнению со средней температурой фанерозоя сейчас холоднее на 8° , а по сравнению с меловым периодом — на $10\text{—}15^\circ\text{C}$.

Похолодания вызываются извержениями вулканов и падением астероидов. Но в этом случае температура понижается с точки зрения геологических масштабов времени практически мгновенно, но ненадолго, на год-другой. Этого достаточно, чтобы вызвать массовую гибель многих видов животных, но недостаточно, чтобы

изменить ход геофизических процессов в атмосфере и гидросфере. Какая же причина могла вызвать медленное, но очень длительное снижение температуры?

По мнению авторов этой книги, в этом могли оказаться виновными астрозоли. В 1959 г. советский теоретик Ю. П. Райзер проанализировал процесс столкновения астероида с Луной и пришел к выводу, что в этом случае должно испариться количество вещества, сравнимое с массой астероида, а потом превратиться в частицы, сравнимые по размеру с длиной солнечного излучения. Масса астероида может быть очень большой. На Луне есть кратеры диаметром в сотни километров. Чтобы образовался такой кратер, в Луну должен врезаться астероид массой $10^{10}\text{—}10^{15}$ т. Что же будет, если в околоземном пространстве образуется облако астрозоля такой массы? Вспомним, что для наступления «ядерной зимы» достаточно всего $2 \cdot 10^6$ т аэрозоля? Конечно, достаточное количество астрозоля тоже может повлиять на температуру Земли. Климатологи подсчитали, что для наступления полного оледенения Земли достаточно уменьшения потока солнечной энергии всего на 10%. Но как должно вести себя облако астрозоля, чтобы вызвать плавное, но очень длительное похолодание? Очевидно, облако должно влиять на радиационный баланс планеты не очень сильно, но очень долго. Возможно ли это?

Рассмотрим судьбу астрозольных частиц, выброшенных с поверхности Луны со скоростью, большей второй космической для Луны, но меньшей второй космической для Земли. При соответствующем направлении выброса значительная доля частиц будет захвачена полем земного тяготения. Станут ли при этом пылинки «микроспутниками» Земли? Нет. Иначе бы имелись «пылевые спутники» постоянно.

На астрозольную частицу в околоземном пространстве действуют кроме земного тяготения солнечное дав-

ление и магнитное поле Земли. Световое давление в вакууме способно сообщить ускорение $0,15 \text{ см/с}^{-2}$ частице диаметром 1 мкм. Это много. Меньше чем за сутки частицы ускорятся до скорости, большей второй космической, и будут «сдуты» солнечным давлением с земной орбиты. Но под действием солнечного излучения частицы благодаря фотоэффекту должны приобретать довольно большой электрический заряд, — скажем, 10^4 элементарных зарядов на частицу. Это значит, что в магнитосфере Земли — а на ночной стороне Земли она тянется на сотни тысяч километров — частицы будут подвержены действию силы Лоренца, сворачивающей траекторию движения частиц в спираль вокруг трубок магнитных силовых линий.

Солнце испускает поток протонов и электронов, которые также захватываются магнитным полем Земли. В отличие от спутников, вращающихся вокруг планеты по круговым или эллиптическим орбитам, заряженные частицы, отношение заряда к массе для которых достаточно велико, чтобы сила Лоренца была больше силы земного притяжения, двигаются иначе. Двигаясь по сужающейся спирали, они приближаются к земной атмосфере, втягиваются в область, где напряженность магнитного поля велика, и выталкиваются из нее обратно, по расширяющейся спирали удаляются от Земли, пересекают экваториальную плоскость, после чего магнитные трубки снова начинают сжиматься и частица снова приближается к Земле, но уже в другом полушарии и снова выталкивается обратно. Частицы оказываются в магнитной ловушке и живут в ней долго, перемещаясь из одного полушария в другое и обратно. Чем больше энергия частиц, тем ближе пояс, в котором они движутся.

Энергия астрозольных частиц намного больше, чем у солнечных протонов, — ведь они намного тяжелее. Поэтому астрозольные частицы, хотя тоже должны

двигаться по спиралям, будут проникать глубже в магнитное поле Земли, в верхнюю атмосферу, тормозиться там и оставаться, осаждаться на Землю.

Значит, стабильное астрозольное облако вблизи Земли существовать не может? Нет, может. В Солнечной системе есть длительно существующие астрозольные объекты вблизи планет. Это кольца Юпитера, Сатурна, Урана. Откуда взялись кольца Сатурна и Урана? Очень может быть, что они образовались в результате разрушения спутников планет при столкновении с астероидами (хотя есть и другие гипотезы). В кольцах Сатурна есть частицы микрометрового размера. Поэтому кольца сильно рассеивают свет и отбрасывают интенсивную тень на экваториальную область Сатурна.

Почему же эти частицы до сих пор не затормозились магнитосферой Сатурна и не поглотились его атмосферой? Осаждение материи из внутреннего кольца идет непрерывно, но кольца сохраняют свои поглощающие свойства. Это происходит благодаря тому, что основная масса колец Сатурна заключена в крупных обломках, которые беспрестанно между собой сталкиваются. При этом образуются все новые и новые порции астрозолей.

Масса обломков должна была образоваться и при ударе астероида о Луну, а потом захватиться полем земного тяготения. Расчеты показывают, что при ударе астероида о поверхность Марса скорость обломков не превысит второй космической скорости для этой планеты, а это еще меньше второй космической скорости для Земли. Получается, что астрозольно-обломочное кольцо должно было существовать и вокруг Земли. Куда же оно исчезло? Отметим, что кольца Сатурна существовали не всегда. Кольца разрушаются, разрушилось и земное кольцо.

А как земное кольцо могло влиять на климат? На этот вопрос можно ответить только после решения очень сложных математических задач. Но ясно, что

небольшое затенение экваториальной зоны могло сказываться на климате постепенно. Почему же теплый климат фанерозоя не восстановился до сих пор, когда кольцо уже исчезло?

После сильного похолодания возрастает способность Земли отражать солнечное излучение. Меньше становится растительности, которая хорошо поглощает энергию. Появляются ледяные шапки, которые хорошо ее отражают. Лишь за счет медленного прироста растительности Земля может восстановить утраченную способность усваивать солнечное тепло. Так однажды произошло. Ледниковые периоды были когда-то очень давно, более 600 млн. лет назад, в докембрийскую эпоху. А потом наступил теплый фанерозой. Может быть, и сейчас Земля возвращается к теплому климату. Но истребление лесов, загрязнение атмосферы аэрозолями могут этому помешать.

Как проверить гипотезу «космической зимы»? Доказательством существования исчезнувшего кольца могло бы явиться нахождение на земле обломков лунного материала. Похожий материал на Земле находят, но за миллионы лет он мог неузнаваемо измениться под воздействием воды и атмосферы. Доказать его лунное происхождение практически невозможно. Есть на Земле и осадки космической пыли — в донных отложениях океанов, в ледниках Гренландии и Антарктиды. Источников космической пыли много — сгорание метеоритов, взрывы при падении астероидов и комет на Землю, прохождение Земли через кометные хвосты. Может быть, подтверждение гипотезы надо искать совсем в другом месте — на Марсе.

Над Марсом на небольшой высоте — около 2,5 радиуса Марса вращается небольшой спутник Фобос. На Фобосе, на стороне, обращенной к Марсу, есть крупный кратер Стикни — следы удара астероида. Столкновение, приведшее к образованию этого кратера, должно было

сопровождаться образованием космозольно-обломочного кольца. Из-за близости к поверхности Марса кольцо должно было быстро разрушиться. В этом случае в экваториальной плоскости Марса на его поверхности должно находиться большое количество обломков Фобоса. Материал Фобоса совсем иной, чем Марса, и эти обломки легко отличить от марсианских пород. Очень может быть, что, когда космонавты высадутся на Марс, они обнаружат такие обломки, и это будет свидетельством в пользу того, что кольца возникают время от времени вокруг всех планет, имеющих безатмосферные спутники.

Во всяком случае, если бы на Марсе существовала цивилизация, она вряд ли бы пережила катастрофу, связанную с ударом астероида о Фобос. Мгновенное запыление атмосферы Марса привело бы к очень резкому снижению температуры, худшему, чем при любом варианте «ядерной зимы».



*Игорь Васильевич
Петрянов
Александр Георгиевич
Сутугин*

Вездесущие аэрозоли

ИЗДАНИЕ ДЛЯ ДЕТЕЙ И ЮНОШЕСТВА

Содержание

Введение

3

Аэрозоли в природе

5

Аэрозоли на службе человека

28

Аэрозоли-враги

42

Аэрозоли-убийцы

56

Арсенал защитных средств

63

Как исследуют аэрозоли

81

Отбор и фильтры

92

Аэрозоли — среда обитания небесных тел

95

Художник
А. Б. Симаков

Заведующий редакцией
А. А. Чуба

Редактор
Н. Н. Габисония

Мл. редактор
А. Б. Фролов

Художественный редактор
В. П. Храмов

Технические редакторы
Л. А. Зотова, С. Н. Жданова

Корректор
В. Н. Рейбекель

ИВ № 1405

Сдано в набор 27.12.88. Подпи-
сано в печать 23.06.89. Формат
70×108¹/₃₂. Бумага офсетная
№ 1. Офсетная печать. Гарниту-
ра школьная. Усл. печ. л. 4,9.
Уч.-изд. л. 5,0. Усл. кр.-отт.
20,125. Тираж 96 000 экз. Заказ
№ 2998. Цена 30 коп.

Издательство «Педагогика»
Академии педагогических наук
СССР и Государственного коми-
тета СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торгов-
ли,
107847, Москва, Лефортовский
пер., 8.

Ордена Трудового Красного Зна-
мени Калининский полиграфи-
ческий комбинат Государствен-
ного комитета СССР по делам из-
дательств, полиграфии и книж-
ной торговли.
170024, Калинин, пр. Ленина, 5.





**Читайте
следующую
книгу
библиотечки**

**«Ученые —
школьнику»!**

Книга «Монеты рассказывают» посвящена науке нумизматике, показывает ее значение в изучении истории человечества, экономической жизни и торговых связей народов, для раскрытия тайн прошлого.

Юные читатели найдут в книге увлекательные истории о монетах Древней Греции и Рима, арабского Востока и Византии, Древней Руси и средневековой Европы, о деньгах и монетах недавнего прошлого и современных, о развитии нумизматики в нашей стране.

Автор — советский ученый, доктор исторических наук Г. А. Федоров-Давыдов знакомит читателей с историей нумизматики, ее основными понятиями и методами. Он доказывает, что нумизматика это не простое коллекционирование монет, а отрасль исторической науки.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ПЕДАГОГИКА»**