

А. Д. ЗИМОН  
**Аэрозоли,**  
или Джинн,  
вырвавшийся  
из бутылки



НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

А. Д. ЗИМОН

# **Аэрозоли, или Джинн, вырвавшийся из бутылки**



МОСКВА  
„ХИМИЯ”  
1993

ББК 20.1  
362  
УДК 54-138

Серия НПБШ основана в 1986 году.

Рецензент доктор химических наук *Б. Ф. Садовский*

**Зимон А. Д.**

362      Аэрозоли, или Джинн, вырвавшийся из бутылки. М.: Химия, 1993.— с. 208: ил. (Научно-популярная б-ка школьника)  
ISBN 5—7245—0581—9

В занимательной форме рассказывается об аэрозолях — дисперсных системах, в которых мелкие частицы находятся во взвешенном состоянии в газовой среде (чаще — в воздухе). Подобно вырвавшемуся из бутылки джинну, аэрозоли многолики и всепроникающи. Дымы, туманы, смог — все это аэрозоли. Даны представления об атмосферных, космических, промышленных и других аэрозолях, образующихся естественным путем и создаваемых искусственно, об их практическом использовании и борьбе с ними. Рассказывается о влиянии аэрозолей на погоду и климат, на состояние окружающей среды.

Широкому кругу читателей, и прежде всего школьникам, интересующимся проблемами современного естествознания. Может быть полезна также специалистам, занимающимся аэрозолями в разных отраслях промышленности.

З  $\frac{1708000000-051}{050(01)-93.}$  КБ-49-36-92

ББК 20.1

ISBN 5—7245—0581—9

© А. Д. Зимон, 1993.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора (вместо введения)	5
МНОГОЛИКИЙ ДЖИНН	7
И все же — почему джинн?	7
Невидимки	10
Лос-Анджелесский смог и гибель Лысого орла	15
Снег для зимней олимпиады и снег на Марсе	18
Из искры — пламя	20
ДДТ в снегах Антарктиды	22
Молекулы и муравьи	27
Капля, капелька, капеличка, каплюшка, каплища	30
Белая сажа	33
«Пума»	36
ДЖИНН В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ	41
Двадцатитонный джинн	41
Облако в штанах	43
Капли и кристаллы	47
Джинн порождает джинна	49
Морозной пылью серебрится...	53
Погода по заказу	56
Живая пыль	58
Поземка и ветровая эрозия, буран и пыльные бури	60
В одну и ту же реку нельзя войти дважды	64
«Вещи от сгущения света видеть можно»	68
Сто сорок солнц	73
10 тысяч лучей пронизывают каплю	76
Гиперболоид инженера Гарина	79
ДЖИНН В КОСМОСЕ	82
Эксперимент «Экстинкция»	82
Автографы из космоса	84
Один из экспериментов программы «Союз — Аполлон»	86
Космос — Земля, Земля — космос	89
Аэрозоли Вселенной	92
Астрозоли	94

Сведения давностью более четырех миллиардов лет	97
Происхождение Земли и жизни на ней	98
На пыльных тропинках далеких планет	102
«Веги»	105
«Веги» ведут «Джотто»	108
«Тигр», не похожий на тигра	111
 ДЖИНН — ТРУЖЕНИК	 113
И жнец, и швец	113
Лечить и среду	117
Попасть в яблочко	120
Не нагревать выше 50 °С!	125
Посуда, замша, бархат	128
Распыляя, сушим	132
В кипящем слое	133
Контраст яркости	138
Экономия на дыме	141
Против ракет и самолетов; ночные невидимки	145
 ДЖИНН НА СВОБОДЕ	 148
В трубу	148
Мимо рта	152
Кислотные дожди	155
Последний день Помпеи	159
Жизнь и внеземные вулканы	163
Колокольный звон и набат	165
Нет важнее задачи	169
Алмазная пыль	173
Невидимые враги (аллергия)	176
 УКРОЩЕНИЕ ДЖИННА	 179
Человек — фильтр	179
По инерции	181
Загнать джинна в бутылку!	183
Возвращение на круги своя	187
Фильтры Петрянова	190
Сама природа	192
Закрепостить джинна	196
 Джинн в бутылке и вне ее (вместо заключения)	 201
Рекомендательная литература	203

## ОТ АВТОРА (ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ)

В древних восточных сказаниях повествуется о фантастических существах — джиннах, наделенных могучей силой и способных совершать чудеса. Когда-то царь Соломон за непокорность заключил джиннов в сосуды, запечатав горлышки магической печатью. Тысячелетия спустя люди находили эти сосуды и, вскрывая их, выпускали на волю волшебников, могущих творить как зло, так и добро (вспомним, например, старика Хоттабыча).

В этой книге речь пойдет об аэрозолях, т. е. о таких системах, в которых множество разных по форме и размерам мелких частиц распределено в газовой (воздушной) среде. Что общего у аэрозолей со сказочными джиннами?

Арабское слово «джинн» означает «дух». Аэрозоли подобны вырвавшемуся из бутылки джинну, который, преодолев узы, превращается в свободное существо, состоящее из огня и воздуха и способное парить. Подобно джиннам, аэрозоли свободно перемещаются в атмосфере Земли и во Вселенной — практически всюду, где есть газовая, даже сильно разреженная, среда. Как джинны, они могут нести и добро, и зло.

С аэрозолями знакомы все: одни по роду своей работы, другие (и их большинство) — как потребители, третьи постоянно ощущают их воздействие, хотя порой и не подозревают, что речь идет именно об аэрозолях. Не все, однако, представляют себе масштабы «деятельности» аэрозолей и те характерные особенности, которые им присущи.

Аэрозоли определяют, порой в значительной мере, нашу жизнь и в производственной, и в бытовой сферах; они влияют на погоду и климат, на состояние окружающей среды. Существуют различные виды промышленных, сельскохозяйственных, медицинских, биологических, атмосферных и других аэрозолей. Помимо земных, есть космические аэрозоли, которые воздействуют на атмосферу далеких планет, обуславливают структуру звездных и планетных систем, в том числе и Солнечной.

Согласно подсчетам, проведенным в 1970-х годах Н. А. Фуксом, более 500 различных отраслей хозяй-

ственной деятельности и природных процессов связаны с аэрозолями. Аэрозоли многолики: они могут лечить и вызывать заболевания; интенсифицировать тот или иной процесс и стать причиной внезапных взрывов и пожаров; благотворно либо пагубно влиять на все живое; они возникают и исчезают естественным путем; их получают и разрушают искусственно.

Аэрозоли изучает наука, именуемая коллоидной химией, поэтому в книге используются термины и понятия, которыми оперирует эта наука.

Автор надеется, что эта книга пополнит знания, полученные читателем из школьных курсов физики, химии и астрономии, но, главное, представит эти знания в их новом качестве: наука, разделенная на части, живет только в учебниках; для описания и понимания реальных явлений Природы нужна Наука в целом, во взаимосвязи ее отдельных частей. Именно поэтому практическое значение и особенности **различных** аэрозолей автор рассматривает на основе общих свойств, характерных для **всех** аэрозолей, а их специфика и многочисленные аспекты практического применения аэрозолей или борьбы с ними представлены в совокупности. Такой подход оправдан еще и тем, что в литературе, специальной и учебной, рассматриваются главным образом лишь отдельные разделы аэрозольной тематики.

Профессиональное знакомство автора с аэрозолями началось во время Великой Отечественной войны. Дым, сопровождавший разрывы бесчисленных бомб и снарядов, а также дым пожаров был обычным атрибутом фронтовых будней. Однако аэрозоли приходилось создавать и искусственно, в виде дымовых завес для маскировки действий наших войск. Автору, в качестве офицера химической службы 350-го стрелкового полка 96-й стрелковой дивизии, пришлось участвовать в постановке дымовых завес (июль 1944 — май 1945 года). Более 40 лет научной деятельности автора тесно связаны с аэрозолями.

Автор благодарен всем, кто содействовал работе над рукописью: А. А. Балакиреву, В. Д. Колесниченко, своей жене А. А. Зимон и особенно А. М. Цукерману за большую помощь в подготовке текста. Автор всегда будет помнить доброжелательную критику незабвенного Е. Я. Бесидовского.

## МНОГОЛИКИЙ ДЖИНН

### И ВСЕ ЖЕ — ПОЧЕМУ ДЖИНН!

Из восточных сказок мы знаем, что джинн способен вселяться в людей, в животных и в растения, может принимать любую форму и выполнять любые поручения. Сказочный джинн многолик. . .

Что же побудило автора обратиться к легенде о джинне и раскрыть суть одного из возможных его проявлений?

Мировой океан и многочисленные земные водоемы поставляют в атмосферу водяной пар, который после конденсации образует облака, состоящие из взвешенных в воздухе капель и кристаллов. В облаках сосредоточено всего  $10^{-7}\%$ , т. е. одна миллиардная доля количества воды на Земле. Однако и этого количества достаточно, чтобы определять климат и погоду, влиять на урожай, условия труда и жизни людей.

Построенная в 1980 году дамба превратила значительную часть залива Кара-Бугаз Каспийского моря в соляную пустыню. Достаточно небольшого ветерка, чтобы над сульфатным обезвоженным ложем залива протянулись многокилометровые соляные шлейфы, достигающие порой Кубани. До возведения дамбы дно залива надежно укрывалось толщей воды (джинн оставался в бутылке), и возможность образования соляных бурь полностью исключалась.

26 апреля 1986 года произошла Чернобыльская трагедия — взрыв и пожар четвертого блока атомной электростанции. В результате часть радиоактивных веществ в раздробленном виде и газообразном состоянии вырвалась в атмосферу, образовав гигантское аэрозольное радиоактивное облако. По мере его передвижения радиоактивному загрязнению подвергались дороги, посевы, дома — все, что попадалось на его пути. Если бы выброс радиоактивных загрязнений не произошел и джинн остался бы в чреве ядерного реактора, то отрицательные последствия катастрофы были бы неизмеримо меньшими.

Перемещение поршня в цилиндре, которое заставляет автомобиль двигаться, вызывается давлением газов быстро сгорающего мелкораздробленного топлива. Смазка трущихся деталей двигателя осуществля-



ется тонким слоем масла, который формируется из осевших капель. Эти процессы происходят только после того, как топливо и масло подверглись распылению. Если эти вещества находятся в виде компактной массы, быстрое сгорание топлива и эффективная смазка невозможны.

Стоит нажать кнопку баллончика, как его содержимое — это может быть лак для волос, эмаль для окраски, освежитель воздуха и многое другое — вырывается из сосуда и, подобно раскрепощенному джинну, обретает новые качества: способность покрывать поверхность тонким ровным слоем, окрашивать, освежать.

Во время решающего наступления на Берлин для маскировки действий войск 1-го Украинского фронта на реке Нейсе 16 апреля 1945 года была создана дымовая завеса протяженностью 250 км. Она была самой внушительной за весь период Отечественной войны. Искусственно созданные дымовые завесы помогли сохранить жизнь тысячам наступающих.

Облака, радиоактивные частицы в воздухе, соляные бури, препараты, распыляемые из баллончиков, дымовая завеса, капли топлива и масла — лишь отдельные примеры существующего множества систем, именуемых *аэрозолями*. Несмотря на различное целевое назначение рассмотренных в качестве примеров аэрозолей, им присуще нечто общее, а именно: в этих и во всех других многочисленных случаях аэрозоли представляют собой твердые или жидкие частицы, находящиеся определенное время во взвешенном состоянии в газовой (воздушной) среде.

Вновь обратимся к сказкам. В одной из них рассказывается, как однажды открыли выброшенную на берег бутылку и оттуда с шумом и грохотом вырвались клубы дыма, распространились до облаков и приняли облик фантастического существа — джинна. Конечно, в те времена, когда зарождались сказания о джиннах, никто не подозревал, что клубы дыма — это аэрозоли. Освободившийся из заточения аэрозольный джинн строптив; если им не управлять, он может натворить массу бед. Но если взять джинна «под контроль», направлять его действия, он способен сделать много полезного. Поясним более подробно, что представляют собой аэрозоли.

Аэрозоли относятся к системам, которые состоят по крайней мере из двух фаз. Такие системы принято называть гетерогенными, в отличие от гомогенных — однофазных. Фазой называют однородную по составу и физическим свойствам часть системы. Фаза — иное понятие, нежели индивидуальное вещество: чистый воздух, хотя и состоит из смеси газов, является типичной однофазной (гомогенной) системой, тогда как жидкость (скажем, вода) и ее пары — одно вещество, но две фазы: жидкая и газообразная. В атмосфере Земли воздух, не содержащий примесей в виде частиц, практически отсутствует.

Среди гетерогенных различают системы с развитой межфазной поверхностью, т. е. такие, в которых по крайней мере одна фаза находится в раздробленном состоянии и распределена в другой фазе. Такие системы называют дисперсными (латинское слово *dispersus* означает «рассеянный», «рассыпанный»). Газ (в земных условиях — это чаще всего воздух) составляет *дисперсионную среду* аэрозолей. В раздробленном состоянии находятся вещества, составляющие *дисперсную фазу* аэрозолей.

Таким образом, аэрозоли — это дисперсные системы, состоящие из непрерывной (сплошной) газовой дисперсионной среды и раздробленной на частицы дисперсной фазы. В приведенных примерах дисперсной фазой являются капли воды, топлива и масла, различные препараты, кристаллы льда, частицы дымообразующих веществ, загрязнения. Аэрозоли многолики... Любой твердый материал и любую жидкость можно превратить в аэрозоли. Пары, конденсируясь, способны образовать капли. Переход веществ в аэрозольное состояние может происходить независимо от человека и по его воле, и, к сожалению, по его неразумению.

Слово «аэрозоль» греко-латинского происхождения: «аэр» (*αἴρ*) по-гречески означает «воздух»; термином «золь» называют коллоидные системы или коллоидные растворы, он происходит от латинского *solutio*, что означает «раствор». Дословно «аэрозоль» — это «золь в воздушной среде». Этим названием подчеркиваются признаки дисперсной системы: «аэро» характеризует непрерывную воздушную (в общем случае газовую) среду, а «золь» — состояние

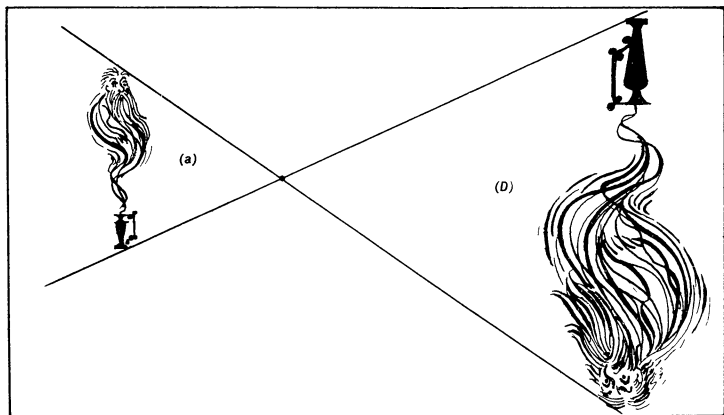
вещества в виде частиц, из которых формируется дисперсная фаза.

Объединение в единой системе раздробленной и сплошной фаз придает аэрозолям особое качество. Свойства аэрозолей определяются не только размерами, формой, числом частиц, особенностями газовой среды, но и взаимовлиянием частиц и среды. Рассмотрение этих свойств начнем с размера частиц.

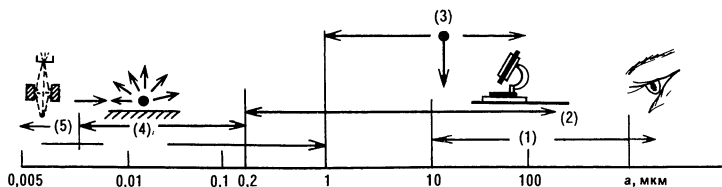
### НЕВИДИМКИ

Слово «аэрозоль» невольно вызывает представление о поднятой ветром пыли, облаках и туманах, дыме пожарищ, извержениях дымовых труб, которые до сих пор служат характерным «украшением» промышленного пейзажа; но это — только видимые образы, а видим мы далеко не всё.

Обычно глаз человека не способен различать в воздухе частицы размером менее 10 микрометров (или, сокращенно, мкм;  $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ ). (Для сравнения: диаметр женского волоса равен в среднем примерно 20 мкм, мужской волос несколько толще.) Более мелкие частицы, размером до 0,2 мкм, можно увидеть в оптический микроскоп. Для обнаружения мельчайших невидимок разработан и применяется на практике ряд методов, позволяющих различать аэрозольные частицы, состоящие из нескольких молекул.



Дисперсность ( $D$ ) обратно пропорциональна размеру частиц ( $a$ )



Способы визуализации аэрозольных частиц разного размера

Невидимки далеко не «мелочь»: значительную часть атмосферных и космических аэрозолей составляют мельчайшие частицы, которые, как можно будет убедиться в дальнейшем, проявляют себя в процессах, отнюдь не относящихся к «мелочным».

И видимая пыль, и невидимые частицы характеризуются определенным размером. В коллоидной химии, которая изучает различные дисперсные системы, в том числе и аэрозоли, помимо размера частиц  $a$  принято использовать обратную величину, называемую дисперсностью и обозначаемую через  $D$ , т. е.  $D = 1/a$ .

Дисперсность наряду с гетерогенностью является важной характеристикой дисперсных систем, в том числе и систем с газовой дисперсионной средой, т. е. аэрозолей.

Диапазон размеров частиц, которые могут образовывать аэрозоли, находится в пределах по крайней мере семи порядков. Такое значительное различие в размерах частиц не может не сказаться и действительно сказывается на свойствах аэрозолей. В зависимости от размеров частиц различают три класса аэрозольных систем: высоко-, средне- и грубодисперсные.

Мельчайшие аэрозольные частицы формируются обычно из 20—30 молекул и имеют размер около 0,001 мкм или 1 нм (напомним, что  $1 \text{ м} = 10^3 \text{ мм} = 10^6 \text{ мкм} = 10^9 \text{ нм}$ ), который часто принимают за минимальный размер аэрозольных частиц. Системы частиц размером более 0,001 мкм и менее 0,1 мкм относят к высокодисперсным. Чем мельче частицы, тем выше дисперсность — отсюда и название. Частицы высокодисперсных систем служат ядрами конденсации паров воды в облаках, обуславливают синеву неба. Мельчайшие невидимки являются неизменными

участниками многих химических и биологических процессов в атмосфере Земли и других планет. Высокодисперсные аэрозоли устойчивы: они могут находиться в атмосфере месяцами и даже годами.

Рисунок демонстрирует, каким путем можно обнаружить частицы и даже определить их размер  $a$ . Глаз человека (1) обычно воспринимает частицы размером не менее 10 мкм. На помощь приходят оптический микроскоп (2), ультрамикроскоп (4) и электронный микроскоп (5). Кроме того, размер частиц можно установить по скорости их оседания в жидкой среде (3).

Системы частиц, видимых невооруженным глазом (размером более 10 мкм), характеризующиеся сравнительно небольшой дисперсностью, называют грубодисперсными. Продолжительность нахождения таких частиц в воздухе исчисляется минутами и даже секундами. Изменение свойств аэрозольных частиц различного размера (от длительного пребывания их во взвешенном состоянии до быстрого оседания) происходит постепенно. Между высокодисперсными и грубодисперсными находятся среднедисперсные системы, частицы которых имеют размер от 0,1 до 10 мкм; такие частицы способны часами висеть в воздухе.

Теперь, когда мы уяснили себе основные понятия, относящиеся к аэрозолям, обратимся к одному из главных вопросов: какие системы и в каких условиях можно считать аэрозольными? Еще раз обратим внимание на смысл термина «аэрозоль», т. е. «золь в воздушной (газовой) среде». Согласно классификации, принятой в коллоидной химии, золи — это высокодисперсные системы. Иначе говоря, истинные аэрозоли должны формироваться лишь из невидимок размером от 0,001 до 0,1 мкм. Такое представление об аэрозолях противоречит практике. Дело в том, что в газовой среде, в частности в атмосфере Земли, могут возникать мощные скоростные потоки, которые увлекают и достаточно долго удерживают во взвешенном состоянии довольно крупные частицы (песок, частицы грунта и др.). Кроме того, ряд свойств аэрозолей (электрический заряд, способность к поглощению паров и др.) характерен для систем, образующихся из частиц различного размера, в том числе средние и грубодисперсных.

Поэтому основным отличительным признаком

аэрозолей следует считать относительное постоянство концентрации аэрозольных частиц, которое поддерживается благодаря способности аэрозольных частиц находиться во взвешенном состоянии, а также поступлению новых порций частиц взамен ушедших. Если с таких позиций подойти к определению аэрозолей, то снег и обложной дождь можно рассматривать как аэрозоли. Действительно, на смену осевшим каплям или снежинкам в тот же объем поступают новые, и их концентрация остается практически неизменной, а порывы ветра меняют лишь направление полета снежинок и капель (косой дождь).

Аэрозоли могут занимать ограниченное пространство с более или менее выраженной границей. К подобным системам относятся облака, выбросы пылевых предприятий, шлейфы пыли, струя распыленной на капли жидкости, хвосты комет. Граница аэрозольной системы, заключенной в замкнутом пространстве, определяется контурами этого пространства. Типичный пример — аэрозоли в помещении. Вместе с тем и в атмосфере Земли, и в космическом пространстве существуют аэрозоли, границу которых трудно, а порой и невозможно определить.

Помимо размеров частиц очень важным параметром аэрозольных систем является концентрация, т. е. число частиц в единице объема (кубическом метре, литре или кубическом сантиметре). Определенную таким образом концентрацию называют счетной, а иногда частичной, и обозначают через  $v_c$ .

Счетная концентрация аэрозолей может изменяться в широком интервале значений. Так, в среднем, над океаном и в горах на высоте 1000—2000 метров счетная концентрация составляет 1000, в сельской местности — 10 000, а в больших городах до 100 тысяч частиц в 1 см<sup>3</sup>. Трудно себе представить, что в одном кубическом сантиметре воздуха Москвы, который ежесекундно вдыхают почти 10 миллионов человек, содержатся десятки тысяч аэрозольных частиц, однако это так.

В воздухе, который мы считаем чистым, находится множество не видимых глазом мельчайших частиц. Свидетельство тому — слой пыли на мебели и предметах домашнего обихода: как бы тщательно их ни протирали, через несколько дней пыль появляется

снова. Талый грязный снег в городах весной, налет на оконных стеклах — «визитные карточки» атмосферных аэрозолей.

Хотя число аэрозольных частиц в атмосфере велико, сами частицы столь малы, что суммарная масса их ничтожна и массовая концентрация  $v_m$ , т. е. масса частиц в единице объема аэрозоля, незначительна. Ее измеряют в  $\text{кг/м}^3$ ,  $\text{мг/м}^3$ ,  $\text{мг/л}$  или  $\text{мг/см}^3$ .

Большинство частиц, находящихся в воздухе, имеют размер не более 0,1 мкм, т. е. относятся к высокодисперсным; поэтому счетная концентрация сравнительно велика, а массовая концентрация небольшая и обычно составляет 0,2—20  $\text{мг/м}^3$  или  $(0,2—20) \times 10^{-6} \text{ мг/см}^3$ . Основной вклад в массовую концентрацию атмосферных аэрозолей вносят частицы диаметром более 1 мкм, хотя их счетная концентрация измеряется всего несколькими единицами или десятком частиц на 1  $\text{м}^3$ .

Счетная и массовая концентрации атмосферных аэрозолей зависят от высоты над поверхностью Земли, от источников образования, времени года и суток, а также от других факторов; естественно поэтому, что концентрации изменяются в широком интервале.

Особо чистый воздух необходим при производстве электронных блоков приборов. Достаточно подуть в узел прибора одной аэрозольной частичке, и он может оказаться неработоспособным. Поэтому в таких производствах приходится избавляться от аэрозольных частиц. В воздухе промышленных городов их количество может достигать сотен миллиграммов в кубическом метре, а в атмосферных облаках и туманах — 1000  $\text{мг/м}^3$ . При извержении вулканов концентрация аэрозольного пепла может превышать концентрацию аэрозолей в облаках в десятки тысяч раз. Повышенную концентрацию аэрозолей иногда можно оценить визуально. Например, газующий грузовик или автобус выбрасывает видимое облако черного дыма в том случае, когда массовая концентрация сажи составляет 600  $\text{мг/м}^3$ . При массовой концентрации в пять раз меньшей выхлоп едва заметен.

## ЛОС-АНДЖЕЛЕССКИЙ СМОГ И ГИБЕЛЬ ЛЫСОГО ОРЛА

Свойства аэрозолей зависят не только от размеров и концентрации частиц, но и от их агрегатного состояния. Для описания аэрозольных систем их принято обозначать в виде условной косой дроби, причем в знаменателе дается сокращенное обозначение агрегатного состояния дисперсионной среды (см. таблицу). У аэрозолей — это газ. Дисперсионной средой большинства земных аэрозолей является воздух. В космосе газовая среда сильно разрежена, а в случае плазмы газ частично или полностью ионизован. Аэрозоли существуют в атмосфере других планет, в частности, в атмосфере Венеры, которая состоит в основном из диоксида углерода (углекислого газа) с небольшой примесью азота.

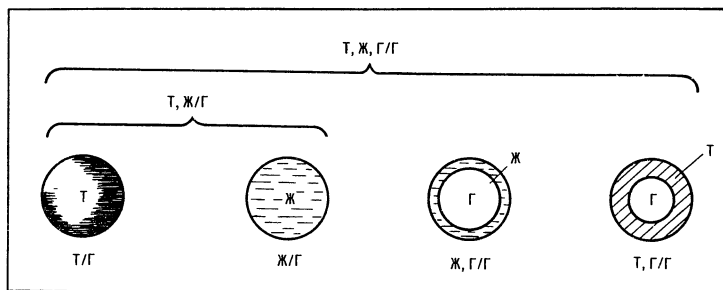
Наиболее простыми являются аэрозоли, дисперсная фаза которых состоит из твердых частиц или капель, причем каждая из этих систем имеет свое традиционное название. Так, средне- и высокодисперсные системы типа Т/Г называются дымом, а грубодисперсные — пылью. Осадок из крупных частиц также называют пылью; точнее, пылью следует считать не аэрозоль как таковой, а его дисперсную фазу, т. е. твердые частицы. Поэтому аэрозоли из частиц пыли правильнее назвать пылевым облаком. Средне- и высокодисперсные системы типа Ж/Г можно отнести к туманам.

### Классификация и обозначение аэрозолей

Дисперсная фаза аэрозолей	Условное обозначение	Принятое название
Твердая	Т/Г	Дым, пыль
Жидкая	Ж/Г	Туман
Твердая и жидкая	Т, Ж/Г	Смог
Жидкая пена	Ж, Г/Г	Жидкая аэрозольная пена
Твердая пена	Т, Г/Г	Твердая аэрозольная пена
В виде газовых образований *	Г/Г	Клатраты
Твердая	Т/	Аэрозоли

\* Эту систему можно рассматривать в качестве промежуточной, переходящей в систему Т/Г





Возможные варианты формирования и обозначения дисперсной фазы аэрозолей

Аэрозоли типа Т, Ж/Г, дисперсная фаза которых одновременно состоит из жидких и твердых частиц, называют смогом. Этот термин происходит от английских слов *smoke* — «дым» и *fog* — «туман», т. е. «смог» буквально переводится как «дымотуман». Смог образуется в атмосфере всех крупных городов и промышленных центров. Он опасен для всего живого, особенно если город расположен в котловине, как, например, Лос-Анджелес, где к тому же стоит обычно безветренная теплая погода.

Церемония открытия Олимпийских игр в Лос-Анджелесе летом 1984 года предполагала участие знаменитого Лысого орла. Эта грозная птица, символизирующая могущество США, простирает крылья в центре государственного герба страны. Птицу заранее привезли в город, но, попав в удушливую атмосферу, орел вскоре погиб: его легкие оказались поражены городским смогом. Последствия смога губительны не только для животных; страдает здоровье людей, разрушаются исторические памятники и технические сооружения. Население многих городов видит солнце сквозь пелену, создаваемую смогом. Парижский смог, в котором много веществ повышенной химической активности, не пощадил металлические конструкции знаменитой Эйфелевой башни.

Названия аэрозолей, приведенные в таблице, разумеется, несколько условны. В этом можно легко убедиться. Дым, например, обычно ассоциируется с аэрозолями, которые образуются после сгорания топлива. Вместе с тем одно и то же топливо, сгорая в различных условиях, может образовывать или не

образовывать дым (т. е. , в соответствии с принятой классификацией, систему Т/Г). При сгорании водородсодержащих топлив нельзя избежать появления воды, а следовательно, и тумана, который в данном случае традиционно называют дымом. Возможно одновременное возникновение частиц, находящихся в разном агрегатном состоянии. Так, при неполном сгорании древесины помимо твердых образуются жидкие (из воды и смолы) аэрозольные частицы. Подобные системы точнее назвать смогом, а не дымом. Знаменитые в прошлом плотные лондонские туманы — по существу смоги — образовывались преимущественно за счет неполного сгорания каменного угля в каминах огромного числа домов.

Иногда, подразделяя аэрозоли на смог и дым, имеют в виду источник образования аэрозольных частиц, а не их агрегатное состояние: выбросы транспорта и промышленных предприятий называют смогом, а клубы, что образуются при неполном сгорании, — дымом. В одной и той же системе типа Т/Г могут быть частицы различного размера; такие системы одновременно являются и дымом, и пылью. Дым, извергаемый курильщиками, на самом деле является аэрозолем типа Ж/Г, т. е. туманом.

Таким образом, читатель должен принять к сведению неточность традиционной терминологии. Мы же в дальнейшем будем придерживаться той классификации аэрозолей и терминологии, которые приведены в таблице.

Существуют и другие аэрозольные системы, менее распространенные, но в некоторых случаях не менее важные. Речь идет об аэрозольных пенах — жидких (система Ж, Г/Г) и твердых (система Т, Г/Г). Жидкие аэрозольные пены — пузырьки в воздухе — применяют для тушения пожаров. Примером твердых пен может служить пепел, извергаемый вулканами: он состоит из частиц, поры которых заполнены газом.

Особый тип аэрозолей существует в космическом межпланетном пространстве. Например, на высоте 300 км от поверхности Земли практически нет воздуха, а космическая пыль и метеоритные частицы существуют. Возникает новый тип дисперсных систем без газовой среды — их называли астрозолями (см. таблицу). Подобные системы можно отнести к аэрозолям по

следующим причинам. Космическая пыль и метеориты, находящиеся вблизи планет и комет, окружены атмосферой, т. е. космическая пыль и метеоритные частицы в данном случае представляют собой аэрозольные системы с газовой дисперсионной средой. При попадании в практически безвоздушное пространство они могут превратиться в астрозоли. При вхождении в плотные слои воздуха, например на высоте 100 км от Земли, частицы опять попадают в достаточно плотную газовую среду, т. е. превращаются в аэрозоль.

Следовательно, в безвоздушном, точнее в безгазовом, пространстве космическая пыль и метеоритные частицы существуют в виде астрозолей, т. е. системы типа  $T/$ . (Знак  $/$  означает наличие границы раздела со стороны твердого тела.)

В дальнейшем мы более подробно рассмотрим аэрозоли космического происхождения, в том числе и астрозоли, а сейчас остановимся на характеристике специфической дисперсной системы типа  $\Gamma/\Gamma$  (см. таблицу), которая в определенных условиях может образовывать аэрозоли.

### **СНЕГ ДЛЯ ЗИМНЕЙ ОЛИМПИАДЫ И СНЕГ НА МАРСЕ**

Что общего между снежным покровом лыжных трасс канадского города Калгари, где в феврале 1988 года проводилась зимняя олимпиада, и снегом на поверхности Марса? Наименьшее расстояние этой планеты от Земли составляет «всего» 55 миллионов километров. Общее же — в происхождении снега: это совсем не тот земной снег, который образуется зимой при конденсации паров воды в облаках.

В газовой среде при определенных условиях возникают своеобразные химические соединения, относящиеся к классу так называемых клатратов. Небольшого количества молекул одного вещества достаточно, чтобы в качестве «хозяев» пригласить «гостей», т. е. другие молекулы газовой среды, принять участие в образовании газовых ассоциатов, состоящих из десятков молекул.

Газовые ассоциаты образованы путем включения молекул «гостей» в полость кристаллического каркаса из нескольких молекул или относительно большой



По искусственному снегу — на лыжах

молекулы хозяина; по этой причине клатраты называют также соединениями включения. Плотность газовых ассоциатов будет больше плотности газовой среды, из которой они образовались. Это обстоятельство способствует нестабильности, вследствие которой газовые ассоциаты могут кристаллизоваться. В конечном счете клатраты напоминают снег, который может существовать при положительных температурах.

Обращаем ваше особое внимание на слова «положительная температура». Погода в Калгари отличается удивительным непостоянством. Тянущиеся с севера на юг горы задают направление ветра и температуру воздуха. В отдельные дни олимпиады, особенно на завершающем ее этапе, температура воздуха достигала  $+18^{\circ}\text{C}$ , т. е. зимние соревнования проводились, по сути, при летней погоде. Кругом зелень, и только на искусственной лыжне снежный наст, образованный из клатратов. Роль хозяина снегообразования выполнял микробный протеин (белок), который позволял получать снежинки при температуре, близкой к нулю. В атмосферных условиях, как будет показано ниже, снежинки образуются из паров воды при значительном переохлаждении, когда температура становится ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ . Искусственный и природный снег — это совсем не одно и то же: искусственный плотнее, более влажный, легко смерзается и медленнее тает. Запоздалое таяние его весной

может сказаться на урожаях трав и в конце концов обернуться экологическими потерями.

Поверхность Марса и некоторых комет покрыта снегом. Как он мог появиться, если в атмосфере Марса паров воды очень мало? В атмосфере Марса роль хозяина выполняет небольшое число молекул воды, имеющих кристаллическую структуру (в отличие от протеина на лыжне в Калгари). В этих условиях образуются газовые гидраты, являющиеся разновидностью клатратов. Они-то и могут образовывать аэрозоли, после оседания которых формируется снежный покров.

### ИЗ ИСКРЫ — ПЛАМЯ

Еще древние рудокопы знали, что в подземных выработках иногда выделяется газ, который в смеси с воздухом может взрываться. Подземные взрывы «рудничного газа» — метана и сейчас порой приводят к человеческим жертвам. Взвешенная в воздухе угольная пыль также становится взрывоопасной при концентрации свыше  $100 \text{ г/м}^3$ .

Взрывоопасными в аэрозольном состоянии оказываются и такие «невинные» вещества; как, например, чай. Если пыль, образующаяся при производстве чая, достигнет концентрации  $33 \text{ г/м}^3$  (ниже, чем для угольной пыли), то достаточно небольшой искры, чтобы вспыхнул пожар и произошел взрыв. Чем объясняется повышенная активность веществ, находящихся в аэрозольном состоянии?

Внешняя поверхность пачки спрессованного чая массой 100 граммов равна  $150 \text{ см}^2$  ( $0,015 \text{ м}^2$ ). Суммарная поверхность чайных пылинок диаметром 2 мкм из этой массы чая составляет уже  $300 \text{ м}^2$ , т. е. увеличивается в 20 тысяч раз.

Приведем другой пример. Один литр (или килограмм) воды в банке стандартной формы имеет поверхность около  $0,05 \text{ м}^2$ . Если этот объем распылить в воздухе в виде тумана, диаметр капель которого равен 0,5 мкм или  $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ , то поверхность всех этих капель будет составлять  $12\,000 \text{ м}^2$ , т. е. увеличится в сотни тысяч раз. Напомним, что Красная площадь в Москве занимает  $75\,000 \text{ м}^2$ ; подобная поверхность эквивалентна поверхности водяных ка-

пель тумана, вся масса которых уместилась бы примерно в шести литровых банках.

Раздробленность дисперсной фазы аэрозолей выражают через удельную поверхность:  $B_{уд} = B/m$ . Здесь  $B$  — поверхность всех аэрозольных частиц, масса которых равна  $m$ . Удельная поверхность — это суммарная поверхность всех аэрозольных частиц массой 1 кг. Удельная поверхность чайного «дыма» составляет примерно  $3000 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а капель тумана —  $1,2 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Частицы, образующие газопылевую массу хвоста кометы Галлея длиною в десятки миллионов километров, имеют размеры сотые доли микрометра; удельная поверхность подобных частиц составляет уже сотни тысяч ( $10^6$ ) квадратных метров на 1 кг массы этих частиц.

Значительная поверхность раздела фаз (как следствие раздробленности вещества) сообщает аэрозолям новые качества. Мука, крахмал, сахар и чай, а также ряд других сыпучих материалов не являются взрывчатыми материалами, но в определенных условиях могут гореть. Эти же вещества в аэрозольном состоянии горят настолько интенсивно, что порой процесс оканчивается взрывом. Взрыв связан с высвобождением большого количества энергии за короткое время и с изменением физического и химического состояния вещества за счет протекания различных процессов, в том числе и окислительных. Огромная поверхность аэрозольных частиц способствует активному окислению, поскольку горение локализуется на поверхности частиц. В результате происходит быстрое и одновременное воспламенение аэрозолей, приводящее к взрыву.

Особенно опасен аварийный выброс топлива. Как и всякое сплошное тело, жидкое топливо может гореть только с поверхности. Опасность резко увеличивается при испарении или дроблении топлива. Если в результате аварии самолета лопаются топливные магистрали или баки, то взрыв практически неизбежен. Раздробленное на капли топливо превращается во взрывоопасный аэрозоль. Огонь распространяется с большой скоростью (около  $10 \text{ м/с}$ ), которая в десятки раз превышает скорость горения сплошной массы топлива.

Воспламенение и взрыв аэрозолей могут быть вызваны коронным или искровым разрядом. И в этих случаях причиной взрыва является большая удельная поверхность аэрозольных частиц, способных электризоваться. Обычно электрический заряд аэрозольных частиц в воздухе не превышает 100 элементарных зарядов (напомним, что один элементарный заряд равен заряду электрона и составляет  $1,6 \cdot 10^{-19}$  кулонов). Однако аэрозольные частицы могут адсорбировать ионы, а в процессе перевода порошков в аэрозоль частицы заряжаются за счет трения. Эти и другие причины приводят к резкому увеличению заряда частиц. Если электрический заряд аэрозольных частиц превысит первоначальный в сотни тысяч раз, произойдет электрический разряд, способствующий воспламенению и взрыву. Подобное случается, например, с таким «мирным» продуктом, как сахарная пудра. При транспортировке по трубам сахарные пылинки электризуются и их заряд увеличивается настолько, что создается возможность взрыва. Во избежание этого приходится применять дополнительные меры — в частности, обеспечивать заземление трубопроводов.

Горение и взрыв частиц, находящихся во взвешенном состоянии, — это одно из проявлений взаимодействия между дисперсной фазой и средой в связи с большой удельной поверхностью аэрозольных частиц. Одно, но далеко не единственное. Об этом взаимодействии речь пойдет дальше, и не один раз. Сейчас же сосредоточим внимание на другом важном свойстве аэрозольных систем — взаимном влиянии газовой дисперсионной среды и находящихся в ней аэрозольных частиц, которые составляют дисперсную фазу.

### **ДДТ В СНЕГАХ АНТАРКТИДЫ**

Представим себе, что атмосфера вокруг Земли отсутствует, т. е. мы существуем в условиях вакуума. Тогда капли дождя падали бы беспрепятственно, а их скорость была бы сопоставима со скоростью пули. Обшивку зонтов пришлось бы изготавливать из пуленепробиваемых материалов, а все головные уборы во время дождя сменить на каски. К счастью, в этом нет

необходимости. Воздух оказывает сопротивление падающим каплям и всем другим движущимся аэрозольным частицам, замедляя их скорость.

При определенных условиях сила гравитационного притяжения  $P$ , которая обуславливает оседание частиц, уравнивается силой сопротивления среды. Кроме того, при нахождении частиц в среде, имеющей определенную плотность, необходимо считаться с законом Архимеда. Суммарная сила  $P$  будет равна разности между гравитационной и архимедовой силами.

При движении в газовой среде оседанию частиц препятствует сопротивление воздуха, которое, напомним, характеризуется силой трения  $F_{\text{тр}}$ , определяемой по закону Стокса; эта сила пропорциональна вязкости газовой (воздушной) среды, скорости движения частиц (в данном случае скорости оседания) и их радиусу. Когда скорость частиц достигает такой величины, что их вес уравнивается вертикальной составляющей силы трения  $[(F_{\text{тр}})_b = P]$ , то их движение за счет гравитации становится равномерным.

Существует ряд расчетных формул, которые позволяют определить скорость оседания частиц различного размера и формы (форма подавляющего большинства частиц отличается от идеальной — сферической).

Чем крупнее частицы, тем больше скорость их оседания. Шлейф пыли, тянувшийся в сухую погоду за автомобилем по проселочной дороге, исчезает обычно через несколько минут.

Между тем во взвешенном состоянии могут находиться, и довольно длительное время, даже более крупные аэрозольные частицы. Широко применявшийся еще не так давно в Европе инсектицид ДДТ в виде твердых частиц размером в несколько десятков микрометров обнаружен далеко от мест применения — в снегах Антарктиды и в организмах почти всех живых существ, там обитающих. К 1980 году в Антарктиде накопилось до 2500 тонн этого препарата, значительная часть которого попала на континент в виде аэрозолей. (Кстати заметим, что один из способов определения возраста льдов Антарктиды основан на анализе частиц растительного происхождения, в первую очередь цветочной пыльцы и спор,



которые проделали тысячекилометровый путь в виде аэрозолей и достигли далекого континента.)

В течение веков ветры сносили почву с огромной территории, превращая ее в аэрозоли. Довольно крупные частицы, пролетев тысячи километров, оседали в Северном Китае, образуя плодородные лёссовые отложения в бассейне реки Хуанхэ. В феврале 1979 года жители некоторых районов Югославии, Австрии и Польши наблюдали выпадение необычного желтого снега. Этот оттенок снегу придавали песчинки, которые сильные ветры гнали из африканской Сахары в Европу.

Частицы препарата ДДТ, почвы, а также песчинки относятся к средне- и грубодисперсным системам. Каким же образом эти частицы преодолевают тысячекилометровые расстояния? Еще раз подчеркнем, что беспрепятственное оседание частиц возможно лишь в спокойной атмосфере, в отсутствие перемещения воздуха, а это бывает крайне редко. Даже в комнате, т. е. в ограниченном объеме, имеет место циркуляция воздуха. Причин для перемещения атмосферного воздуха больше чем достаточно.

Визуально порой трудно наблюдать за движением аэрозольных частиц в атмосфере. То, что происходит с частицами в воздухе, можно представить, наблюдая полет воздушных шариков. Они подхватываются воздушными потоками и летят не прямолинейно, а совершают причудливые зигзаги, перемещаясь в различных направлениях.

Зимой окна плотно закрывают: уплотняют, замазывают или проклеивают оконные рамы. И все же в межоконных промежутках скапливается пыль. Откуда она берется? Даже при тщательном заклеивании или замазывании остаются мелкие каналы, доступные для проникания запыленного воздуха. (Вспомним: в  $1\text{ см}^3$  обычного воздуха находятся тысячи мелких частиц.)

Если движение воды ограничено берегами реки или стенками труб, то движущиеся воздушные массы в атмосфере ограничений не имеют. Воздух перемещается из области с более высоким атмосферным давлением в область, где давление ниже. При этом находящиеся в воздухе частицы испытывают дополнительное воздействие, вызванное аэродинамической

# Силы, вызывающие перемещение аэрозольной частицы

силой, которая возникает, когда воздух или газ обтекает какое-либо препятствие (это могут быть и аэрозольные частицы). Аэродинамическая сила, например, заставляет двигаться воздушные шарики и парусные суда.

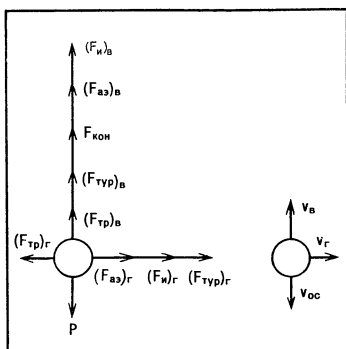
Аэродинамическая сила включает горизонтальную и вертикальную составляющие  $(F_{аз})_г$ ,  $(F_{аз})_в$ . Горизонтальная составляющая заставляет двигаться частицы в направлении потока воздуха, ей противодействует сила  $(F_{гр})_г$ . Вертикальная составляющая создает подъемную силу, препятствующую оседанию частиц.

Горизонтальная составляющая аэродинамической силы определяет сопротивление воздуха движущемуся предмету. Для снижения этого сопротивления поверхности автомобилей, самолетов, бóба (сопротивных саней) делают обтекаемыми.

Когда на пути воздушного потока находится препятствие (шарики, парус и др.), то чем больше его размер (в случае аэрозолей — размер частиц), тем значительнее аэродинамическая сила.

Аэрозольные частицы, гонимые воздушным потоком, приобретают способность двигаться по инерции. Инерционное движение частиц особенно интенсивно при порывистом ветре и при изменении направления воздушного потока. Инерционные силы заставляют частицы отклоняться от направления воздушного потока, когда он сам меняет свое направление. Так при движении частиц появляются горизонтальная и вертикальная инерционные составляющие  $(F_{и})_г$ ,  $(F_{и})_в$ .

Аэрозольные частицы, движущиеся вместе с газовой средой, составляют с ней определенное единство. Инерционное движение означает отклонение от совместного движения частиц и газа. Это как раз то, что отличает фазу от среды. В подобном отклонении



проявляется противоречивость единства аэрозольных частиц и газовой среды, в которой они находятся.

Движение воздуха обычно сопровождается турбулентностью, т. е. образованием беспорядочно движущихся вихрей. Эти вихри, которые имеют протяженность несколько сантиметров, осуществляют дополнительное воздействие на частицы, в том числе и в вертикальном направлении [ $(F_{\text{тур}})_{\text{в}}$ ]. Таким образом, основные силы, препятствующие оседанию частиц, вызваны трением, вертикальной компонентой инерционного и аэродинамического воздействия и турбулентностью.

Оседанию аэрозольных частиц препятствуют и другие факторы. Воздух, нагретый за счет тепла, излучаемого поверхностью Земли, будет более теплым, а следовательно, и менее плотным. Он вытесняется более холодным и более плотным воздухом из верхних слоев. В результате возникает вертикальное конвекционное движение воздушных масс, которое не только предотвращает оседание частиц, но и в состоянии обеспечить их подъем на некоторую высоту (на аэрозольную частицу при этом действует также сила  $F_{\text{кон}}$ ). Кстати, конвекционные потоки воздуха возникают и в жилой комнате, особенно вблизи радиаторов отопления или других источников тепла.

Горизонтальные и вертикальные компоненты действующих на частицу сил изменяются, что приводит к различным вариантам движения аэрозольных частиц. Таких вариантов много. При благоприятном сочетании действия сил даже относительно крупные частицы могут длительное время находиться в воздухе во взвешенном состоянии и переноситься на сотни и даже тысячи километров, подобно частицам ДДТ и грунта.

Перемещение аэрозольных частиц на такие большие расстояния связано с движением огромных воздушных масс и является следствием взаимодействия между газовой средой и частицами. Этот процесс характерен только для аэрозолей. Это отнюдь не означает, что в спокойной атмосфере мелкие аэрозольные частицы остаются неподвижными. Их перемещение вызвано воздействием молекул газовой дисперсионной среды. Рассмотрим, в чем суть подобного воздействия.

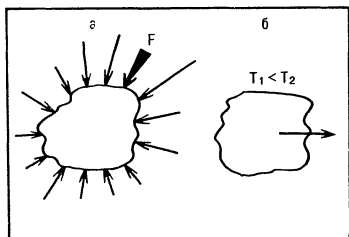
К концу прошлого столетия была разработана молекулярно-кинетическая теория строения вещества, но для ее окончательного утверждения в науке не хватало экспериментальных доказательств. В то же время были обнаружены явления, которые не находили теоретического объяснения. Еще в 1828 году английский ботаник Броун наблюдал в микроскоп хаотическое движение взвешенных в воде частиц: цветочной пыльцы и спор. Вначале это явление связывали с жизненными процессами в наблюдаемых объектах. Впоследствии оказалось, что и частицы неорганической природы способны совершать подобное хаотическое беспрерывное движение, которое по имени его первооткрывателя названо броуновским. Броуновское движение обнаружено и для аэрозольных частиц.

Хаотическое движение частиц можно наблюдать, когда затемненную комнату пронизывает луч света и мельчайшие пылинки становятся видимыми. Кроме поступательного известно и вращательное броуновское движение анизометрических частиц (нитей, волокон) и частиц неправильной формы.

Броуновскому движению долго не придавали особого значения, объясняя его внешними причинами (движением потока жидкости или воздуха, вибрацией аппаратуры и др.). Однако накапливающийся экспериментальный материал отвергал эти предположения. Стало ясно, что броуновское движение вызвано не внешними причинами, а внутренними, присущими системе. Но какими?

Соединить теоретические воззрения молекулярно-кинетической теории с практикой удалось в 1905—1906 годах двум ученым — знаменитому Альберту Эйнштейну и польскому физiku М. Смолуховскому, которые независимо друг от друга объяснили причины и следствия броуновского движения.

... Представим себе муравья, пытающегося сдвинуть булыжник: все его попытки будут напрасны. Если же со всех сторон на булыжник навалится стотысячная армия его собратьев, то наверняка булыжник будет сдвинут в ту сторону, где муравьиные усилия будут наиболее значительными.



Броуновское движение  
и термофорез

Частицы дисперсной фазы окружены молекулами дисперсионной среды. Каждая молекула совершает тепловое колебательное движение и может столкнуться с частицей дисперсной фазы. Удар одной молекулы, так же как и усилие одного муравья в отношении булыжника, останутся без последствий. Молекул дисперсионной среды (для аэрозолей — это газ) много. Подсчитано, что частицу диаметром 100 нм окружают сто тысяч молекул, каждая из которых в секунду может нанести до  $10^{14}$  ударов, т. е. одна аэрозольная частица может воспринять ежесекундно  $10^{19}$  ударов молекул. Если бы сила ударов или импульсы силы (т. е. произведение силы на время ее действия), которые частицы получают со всех сторон, были бы одинаковы, то частицы «топтались» бы на месте.

Мельчайшие частицы испытывают, однако, неодинаковые удары газовых молекул; поэтому возникает результирующая сила  $F$ , заставляющая частицы двигаться. Направление этой силы, соответственно и импульса силы, непрерывно изменяется, а частицы зигзагообразно перемещаются в пространстве.

Выявление причин броуновского движения явилось блестящим подтверждением молекулярной теории строения вещества и нанесло сокрушительное поражение научным концепциям так называемой школы энергетиков во главе с Э. Махом и В. Оствальдом, которые не признавали существования молекул и атомов. Но Вильгельм Оствальд был настоящим ученым, и когда на основе параметров броуновского движения было вычислено согласующееся с другими определениями значение числа Авогадро, Оствальд пересмотрел свои взгляды.

Броуновское движение в полной мере проявляется в отношении мельчайших высокодисперсных частиц.

(Напомним, что такие частицы имеют размеры от 1 до 100 нм.) В отношении среднedisперсных систем оно выражено слабо, а у грубодисперсных отсутствует. Последние, по сравнению с высокодисперсными, можно уподобить глыбе, и статистическое воздействие молекул, обладающих по сравнению с ними ничтожной массой, остается без последствий. Сдвинуть глыбу не в состоянии даже миллионная армия муравьев.

Для высокодисперсных частиц скорость броуновского движения значительно превышает скорость оседания частиц. Частицы будут «витать», т. е. все время находиться во взвешенном состоянии, и в спокойной атмосфере возникает определенное равновесие, когда счетная концентрация аэрозольных частиц остается примерно постоянной. Для относительно крупных частиц, например диаметром 5 мкм, скорость броуновского движения уже примерно в  $10^5$  раз меньше скорости оседания. Поэтому в спокойной атмосфере броуновское движение не является препятствием для оседания таких частиц.

Слипание частиц за счет случайных столкновений, вызванных броуновским движением, называют тепловым коагуляцией. Ее теорию еще в 1912 году предложил уже знакомый нам польский ученый М. Смолуховский.

Теория позволяет с достаточной степенью точности подсчитать время коагуляции и изменение концентрации аэрозолей в процессе коагуляции.

Приходится порой только удивляться, как много пыли накапливается на деталях телевизоров, радиоприемников, на гардинах вблизи радиаторов систем отопления. Причиной такого интенсивного осаждения являются термофорез и электростатическое притяжение.

Термофорезом называют движение частиц в неравноммерном тепловом поле, обычно от более нагретого тела (с температурой  $T_1$ ) в направлении понижения температуры (к  $T_2$ ); на рисунке б это направление показано стрелкой. Со стороны нагретой части газа молекулы налетают на аэрозольные частицы с большей скоростью, чем с менее нагретой стороны, сообщая тем самым частицам дополнительный импульс. Поэтому пылинки перемещаются к более холодным предметам, расположенным рядом с источ-

ником тепла,— гардинам, стенам — и оседают на них. Заметим попутно, что одной из возможных причин движения пылевого облака комет является термофорез, вызванный разностью температур той части пылинок, которая обращена к Солнцу, и противоположной, более холодной поверхности частиц.

В телевизорах, радиоприемниках и других электронных устройствах на различных деталях накапливаются значительные статические электрические заряды, притягивающие пылинки за счет возникшей электростатической силы.

Итак, подытожим сказанное. Причиной «непоседливости» аэрозольных частиц является перемещение газа (воздуха), а для мельчайших частиц — и воздействие молекул газовой среды. Известный советский ученый Н. А. Фукс, впервые обобщивший возможные причины и варианты перемещения аэрозольных частиц, определил их общим термином «механика аэрозолей».

В космосе отсутствует плотная газовая среда, а следовательно, отсутствует заметное воздействие молекул газа на находящиеся там частицы; об этом будет рассказано подробно позже.

### **КАПЛЯ, КАПЕЛЬКА, КАПЕЛИЧКА, КАПЛЮШКА, КАПЛИЩА**

Так в словаре В. И. Даля, по существу, отражена жизнь капли. Капли дождя, размеры которых иногда составляют несколько миллиметров,— это каплищи. Крохотные капли морских брызг, диаметром в несколько микрометров, представляют собой капельки.

Если размеры и форма твердых частиц могут длительное время сохраняться неизменными, то капли более мобильны — они способны укрупняться и разукрупняться, испаряться и деформироваться. Воздействие газовой среды на каплю характеризуется рядом особенностей. Жидкая дисперсная фаза аэрозолей находится в своеобразном газовом сосуде, менее прочном и жестком, чем обычная емкость, и поэтому не определяющем форму и размер капель.

Сферическая форма капель сохраняется в условиях невесомости, например в кабинах космических кораблей. Под действием гравитации лежащая капля несколько сплющивается, а висящая приобретает

вытянутую, типичную каплевидную, форму. Однако движущаяся капля ничего общего не имеет с висящей каплей.

Капли деформируются потоком воздуха и вытягиваются (особенно крупные капли) довольно странным образом, не вдоль, а поперек траектории полета. Этот кажущийся парадокс объясняется тем, что лобовая аэродинамическая сила сплющивают каплю, и вместо хорошо обтекаемого тела капля становится плохо обтекаемой, дискообразной. Неизбежное изменение скорости и направления воздушного потока сказываются на форме капель, и капли в воздушном потоке все время «дышат».

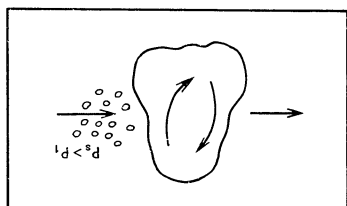
Помимо изменения формы капель воздушный поток осуществляет дробление крупных капель на более мелкие. В зависимости от скорости воздушного потока реализуются различные варианты дробления: образующийся диск может распадаться на капельки, возникает отрыв поверхностного слоя жидкости и образование капелек, возможен и одновременный распад всей крупной капли на более мелкие.

Большую роль в жизни капель играют температура окружающей среды и воздействие различных естественных и искусственных источников тепла.

Время жизни капли определяется также испарением. В спокойном воздухе, при  $50^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности 90% одиночные капли воды диаметром 2 мкм испаряются за 0,05 секунды, 20-микрометровые — за 4,3 секунды и 200-микрометровые — за 6,1 минуты. Подчеркнем еще раз, что это время испарения одиночных капель в атмосфере, далекой от насыщения. Если капель много, а воздушная среда насыщена парами жидкости, то капли будут существовать более продолжительное время. Примером тому облака, о которых речь пойдет дальше.

Внутри капель — своя жизнь. Отдельные части капли могут нагреваться неравномерно. В результате происходит перемещение жидкости уже в массе самой капли, когда более нагретая, а следовательно, менее плотная часть жидкости капли поднимается вверх, вытесняя более холодную жидкость. Перемещение жидкости внутри капли сопровождается ее перемешиванием и происходит до тех пор, пока температура жидкости во всех частях капли не уравнивается.





Так возникает диффузиофорез  
и конвективное движение  
жидкости в капле

Для превращения капелек в капли, и тем более капель — в капليщу необходимо, чтобы несколько мелких капель столкнулись между собой и укрупнились. Для капелек, размеры которых соответствуют высокодисперсным системам, такую возможность предоставляет броуновское движение. Для капель более крупных встреча друг с другом возможна, когда они двигаются с разными скоростями и (или) в различных направлениях.

Столкнувшись капли (так же как и твердые частицы) слипаются, но слипшиеся твердые частицы и слипшиеся капли ведут себя по-разному. Слипшиеся твердые частицы хотя и объединены в агрегаты, но сохраняют свою индивидуальность и отгорожены от соседей поверхностью раздела. При определенных условиях агрегаты могут распадаться, и частицы вновь обретают самостоятельность. Капли же после слипания сливаются в одну большую, жидкость в ней перемешивается; капли, которые пожертвовали собой ради укрупнения своих соседей, утрачивают свою индивидуальность.

С каплями происходят удивительные процессы; один из них связан с их самодвижением. Вспомним барона Мюнхгаузена, который с помощью магических сил вытянул из болота себя самого с конем в придачу. В самодвижении капель «задействованы» отнюдь не магические силы. За счет испарения части капель упругость паров вокруг аэрозольных частиц ( $P_s$ ) становится выше упругости паров той же жидкости в окружающей среде  $P_1$ . Под действием избыточного давления  $P_s$  газовая среда начинает двигаться, увлекая за собой капли. Это движение на рисунке показано прямыми стрелками. Перемещение капель совместно с парогазовой средой называют диффузиофорезом. Движущиеся капли захватывают на своем пути аэрозольные частицы, способствуя очистке возду-

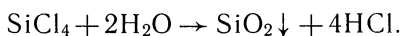
ха. Подобный процесс обуславливает очищение воздуха во время дождя, при орошении и в других случаях.

Итак, в отличие от твердых частиц, капли в большей степени испытывают воздействие газовой (воздушной) среды, приводящее к изменению их размера и формы.

### БЕЛАЯ САЖА

Рассмотрим теперь, как происходит образование самих аэрозольных частиц.

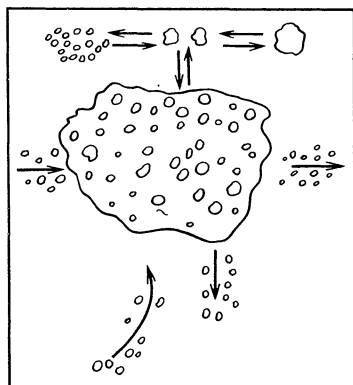
При получении резины в качестве наполнителей используют сажу. Обычно сажу представляют себе в виде черного порошка. В словаре Даля сажа трактуется как копоть, горелая чернь, черное мучнистое вещество. Вообще, сажа — это то, что осаждается; по Далю сажа — это осадок дыма, а дым может быть белым. Поэтому не следует удивляться существованию белой сажи, которую называют еще аэросилом. Ее используют для изготовления белой резины и получают, действуя на тетрахлорид кремния ( $\text{SiCl}_4$ ) парами воды в присутствии кислорода при температуре 1000—1100 °С. Схематически получение белой сажи можно представить следующим образом:



Пары двуокиси кремния — диоксида кремния(IV) — конденсируются ( $\downarrow$ ) и образуют белые высокодисперсные частицы сажи. Получение белой сажи — это пример так называемой химической конденсации, когда в результате химической реакции образуются вещества, пересыщенные пары которых конденсируются и возникают твердые аэрозольные частицы (или капли).

Пересыщение паров может создаваться за счет изменения температуры и движения воздуха. Если при конденсации вещество не изменяется, такую конденсацию называют физической. Типичный пример тому — возникновение капель и кристаллов в атмосфере и образование облаков из пересыщенных паров воды. Об этом более подробно можно узнать в следующей главе при знакомстве с атмосферными аэрозолями.

Конденсация заключается в укрупнении ассоциа-



### Жизнь аэрозолей.

Стрелками обозначен приток и отток аэрозольных частиц, в верхней части показано, как образуются аэрозоли путем укрупнения мелких и дробления крупных частиц

тов молекул пересыщенных паров до частиц дисперсной фазы аэрозолей. Газовая среда, кроме того, способна порождать аэрозоли из тех веществ, из которых она сама состоит. Образно говоря, из бутылки вырывается не сам джинн, а его «предшественник» — газообразные продукты, которые, взаимодействуя между собой, превращаются в аэрозоли. В атмосфере Земли таким образом возникают аэрозоли, размеры частиц которых составляют несколько нанометров. Находящиеся в газовой среде атомы и молекулы под действием солнечного излучения могут образовывать субкристаллические группировки атомов и молекул, а также комплексные соединения, называемые кластерами. Молекулярная структура кластеров часто состоит из атомов металлов, образующих своеобразную ячейку. Ячейка окружена атомами неметаллов: галогенов, кислорода, серы, а также молекулами оксида углерода  $\text{CO}$  и некоторых органических соединений.

В атмосфере Земли кластеры могут образовываться из соединения углерода, серы, металлов, многочисленных бытовых и промышленных выбросов. Кластеры укрупняются, слипаются, на них осаждаются малолетучие вещества. Эти и другие процессы приводят к формированию из кластеров высокодисперсных аэрозолей. Значительная часть (до 10%) земных и еще большая часть космических аэрозолей порождается самой газовой средой.

Конденсация и образование кластеров путем укрупнения частиц — важный, но не единственный

путь возникновения аэрозолей. Подобно другим дисперсным системам аэрозоли могут образовываться в результате противоположного процесса, т. е. дробления крупных частиц на более мелкие (так называемое диспергирование).

В естественных условиях при оседании относительно крупных капель дождя диспергирование происходит за счет дробления их на более мелкие. Диспергирование является одним из основных способов получения аэрозолей искусственным путем. Диспергированию подвергаются жидкое и твердое топливо, краски и лаки, лекарственные препараты, косметические средства и многие другие вещества различного производственного и бытового назначения.

Жизнь аэрозолей — это не только образование и исчезновение частиц, это еще и изменение размеров самих частиц, их укрупнение и дробление. С этими процессами мы познакомимся в следующей главе.

Аэрозоли все время изменяются: они возникают и исчезают, укрупняются и дробятся, поступают с потоком газа и уносятся им. Поэтому свойства и состав аэрозолей часто приходится рассматривать не обособленно, а применительно к условиям их образования.

Основную массу атмосферного аэрозоля промышленного происхождения составляют частицы кварца и полевого шпата, т. е. неорганические вещества. Вулканическая пыль содержит рыхлые частицы, напоминающие твердую пену. Пыль от пожара торфяных болот, лесов и других объектов состоит из золы и сажи; пыли биологического происхождения — из мелких организмов, сухих остатков водорослей, чешуек, волос, перьев и других частичек, образующихся из растительных и живых организмов. Аэрозоли, связанные с жизнедеятельностью человека, образуются в жилищах, на улицах, в различных помещениях, в салонах транспортных средств и во всех других местах, где обитают люди. Хозяйственная деятельность человека порождает подлинно грозного джинна — громадные массы антропогенных аэрозолей в виде дыма, пыли, тумана и смога.

### «ПУМА»

Один из приборов, разработанный киргизскими учеными, был установлен на автоматической межпланетной станции «Вега». И хотя он назван экзотическим именем «Пума», к хищным животным это название не имеет отношения. Слово образовалось из первых букв названия прибора — «пылеударный масс-анализатор». Когда космический аппарат попал в светящийся пылевой хвост кометы Галлея, космические пылинки «встретились» с прибором. От столкновения на огромной скорости (она составляла около 80 километров в секунду) пылинки превратились в облако плазмы, состав которой и проанализировал уникальный прибор. Свидание «Веги» с кометой Галлея было коротким, но за это время «Пума» успела «схватить» несколько тысяч пылинок и передать сведения о них на Землю.

Впервые в истории науки проведены прямые, контактные измерения химического состава пыли загадочной, овеянной легендами кометы Галлея. При создании «Пумы» были использованы самые последние достижения масс-спектрометрии, физики высокоскоростного удара, микроэлектроники. В дальнейшем мы убедимся, что получение сведений о космической пыли на основе принципа прибора «Пума» — не единственный способ расшифровки состава аэрозолей Вселенной.

Конечно, состав земных аэрозолей определить проще, но и тут есть немалые трудности. Итак, наше дальнейшее повествование — об анализе аэрозолей, т. е. о способах определения размеров, формы и состава аэрозольных частиц.

Воспользуемся аналогией. Инспектор ГАИ может остановить машину, проверить документы, осмотреть автомобиль, выявить нарушения. Возможен и другой принцип контроля: при помощи соответствующей дистанционной аппаратуры определить скорость автомобиля, наличие вредных выбросов и наблюдать за движением транспорта, не нарушая поток машин.

В известной степени методы анализа аэрозолей сходны с теми методами, которые применяют в ГАИ. Первая группа методов основана на изъятии частиц из аэрозольного облака с последующим их анализом (осмотр автомобиля на месте). Вторая группа методов

основана на анализе частиц, находящихся в естественном состоянии (автомобили в потоке) без нарушения структуры аэрозольного облака. Рассмотрение этих методов дает возможность оценить, насколько порой сложно заполнить визитную карточку аэрозолей.

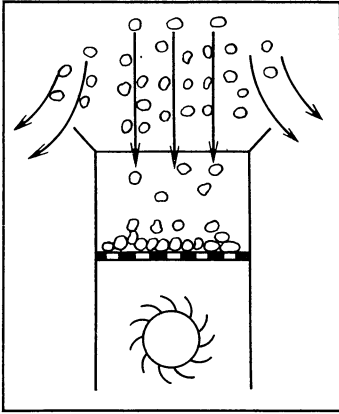
Казалось бы, чего проще — уловить аэрозольные частицы, затем подвергнуть их анализу! При улавливании, однако, необходимо обеспечить идентичность пробы фактическому составу аэрозолей, иначе представление об аэрозолях окажется искаженным. В основе всех методов отбора проб для анализа аэрозолей лежат два процесса — естественное оседание и принудительное осаждение \*.

Достаточно быстро под действием силы тяжести оседают лишь довольно крупные частицы. Для анализа же предпочтительно, чтобы скорость оседания была значительной, что характерно для грубодисперсных систем. Если же на пути запыленного потока поставить поверхность, то на ней будут осаждаться не все частицы, а лишь часть их, остальные будут либо обтекать поверхность, либо по каким-то другим причинам не смогут закрепиться на ней. Иными словами, проба, отобранная при помощи примитивного оседания и осаждения, не будет соответствовать составу аэрозоля, из которого она взята, т. е. будет нарушен основной принцип отбора проб.

Более надежен отбор проб с помощью специальных заборных устройств. Чтобы заставить частицы двигаться к патрубку, необходимо сообщить газовому потоку определенную скорость. Аэрозольные частицы будут увлекаться потоком, но при этом возможно нарушение первоначальной структуры аэрозолей. Дело в том, что вследствие инерции частиц при обтекании патрубка газовым потоком в прибор могут попасть частицы только определенных размеров. Относительно мелкие частицы, двигаясь по линиям тока по периметру заборного патрубка, не попадают в заборное устройство, а относительно крупные

---

\* Для аэрозольных частиц следует различать термины «оседание» и «осаждение». Оседание происходит самопроизвольно за счет гравитации, а осаждение — принудительно под действием внешних сил или условий на препятствия, находящиеся на пути аэрозольного потока



частицы не смогут быть увлечены газовым потоком. В этих условиях мелкие и крупные частицы аэрозолей минуют фильтр-осадитель. В результате аэрозольный анализ будет неточным. Для исключения этих неточностей и более полного улавливания аэрозоль-

ных частиц прибегают к различным ухищрениям: изменяют форму патрубков, подбирают оптимальные скорости просасывания аэрозольного потока, вводят поправочные коэффициенты и т. д. Приборы, работающие по методу отбора проб аэрозолей, были установлены на спускаемых аппаратах станций «Вега», и именно с их помощью был проведен анализ аэрозольных поясов атмосферы Венеры.

Существует много вариантов приборов, в которых реализуются различные принципы улавливания аэрозольных частиц. На американском космическом аппарате «Вояджер» применялись улавливатели космических частиц, состоящие из 200 ячеек, заполненных аргоном и азотом. Эти ячейки крепились на наружной поверхности аппарата. Мелкие космические пылинки диаметром 10 мкм пробивали ячейку улавливателя и вызывали утечку газов; скорость вытекания газа пропорциональна размерам частиц, что и фиксировалось приборами. В спускаемых аппаратах станций «Вега» анализ уловленных венерианских аэрозолей (определялись размер и состав частиц) проводился автоматически с помощью установленных на них приборов. Результаты анализа аэрозолей, полученные непосредственно в Космосе, передавались на Землю.

Чаще, однако, образцы с пробами аэрозолей доставляют в лаборатории, где с помощью современной аппаратуры проводят непосредственное и всестороннее исследование собранных проб. Таким образом поступают при анализе атмосферных аэрозолей

и космических посланцев, когда пробы доставляют на Землю в спускаемых аппаратах. Далекий космос становится близким.

У приборов, работа которых основана на улавливании пыли (их можно отнести к первой группе), есть одно неоспоримое преимущество — возможность непосредственного анализа имеющихся в распоряжении исследователя образцов.

Как мы уже отмечали, одним из основных параметров, определяющих свойства аэрозолей, является размер частиц. Довольно несложно измерить диаметр сферических аэрозольных частиц, да еще таких, которые, подобно шарикам подшипников или бильярдным шарам, имеют один и тот же размер. Однако подобные аэрозоли в земных и космических условиях встречаются очень редко. Пыльца некоторых растений состоит из шарообразных частиц одинакового размера. Часть снежинок имеет вид шестиугольных пластинок и звездочек, а снежная крупа — округленных ядер или ледяных иголок.

Большинство частиц имеет неправильную, порой сложную и даже причудливую форму. Обычно определяют размер таких частиц в трех взаимно перпендикулярных направлениях, т. е. измеряют ширину, высоту и длину частиц. Затем вычисляют средний размер частиц. Кроме того, размеры частиц неправильной формы можно привести к одному — эквивалентному. Эквивалентный размер частиц неправильной формы равен диаметру сферических частиц с учетом какого-либо признака: равновеликой поверхности (при необходимости оценить поверхностные свойства аэрозольных частиц), равного объема (для явлений, связанных с массой частиц), равной скорости оседания (при оценке устойчивости аэрозольных систем).

Одним словом, определить размеры частиц, особенно высокодисперсных, довольно трудно. Разработаны и применяются методы и реализующие их приборы, работающие на различных принципах. При помощи этих методов получают достоверные сведения о размерах аэрозолей.

Анализ аэрозолей в их естественном состоянии поставляет информацию не только о составе аэрозолей, но и о тех изменениях, которые в них происходят. В этом преимущество второй группы приборов.



Информацию о свойствах и процессах в молекулярно-пылевых космических облаках дают наблюдения при помощи радиоволн. Фотоэлектрические счетчики по изменению импульса напряжения позволяют определить число и массу аэрозольных частиц. Методы рентгеновского структурного анализа по интенсивности рассеяния аэрозолями рентгеновского излучения дают сведения о составе космических пылинок. Масс-спектрометры различной конструкции позволяют определить ионы, атомы или молекулы, из которых состоят аэрозольные частицы. Газовая хроматография, основанная на различии в скоростях движения исследуемых веществ вдоль неподвижного адсорбента, применяется для анализа состава капель аэрозолей.

Методы анализа космических аэрозолей и применяемая для этой цели аппаратура все время совершенствуются. Свидетельством этого являются создание и работа первого научного модуля «Квант», состыкованного со станцией «Мир» в октябре 1987 года. Усилиями ученых нескольких государств «Квант» оснащен уникальной научной аппаратурой. При помощи этой аппаратуры успешно проводятся исследования (в том числе и космических аэрозолей) далеких миров, которые пока не посещали космические корабли. Так, в январе 1988 года космонавты В. Титов и М. Манаров с помощью международной орбитальной обсерватории «Рентген» наблюдали Большие Магеллановы облака, расположенные за многие тысячи километров от пилотируемой станции «Мир».

Несмотря на то что длительные и непрерывные наблюдения за аэрозолями, безусловно, чрезвычайно полезны, их анализ при помощи второй группы методов является все же косвенным, так как фиксируются определенные свойства, по которым уже дается характеристика самих аэрозолей. Для одних и тех же аэрозольных систем результаты анализа могут не совпадать. Например, размеры частиц аэрозолей в атмосфере Венеры, полученные «Вегами», оказались меньшими по сравнению с теми, которые определили американские коллеги, так как анализ аэрозолей космическими станциями США основан на других принципах.

Это обстоятельство весьма существенно, так как наиболее полные и достоверные сведения можно

получить именно тогда, когда анализ аэрозолей осуществляется путем сопоставления результатов, полученных различными методами.

Подведем некоторые итоги. Аэрозольных систем много; их можно классифицировать по размеру и агрегатному состоянию дисперсной фазы, происхождению и способу образования. Газовая (воздушная) среда и огромная поверхность множества частиц сообщают аэрозолям уникальные, присущие только им свойства; они могут распространяться совместно со средой, исчезать и возникать. Аэрозоли уподобляются джинну, который вырвался из темницы и способен на многое.

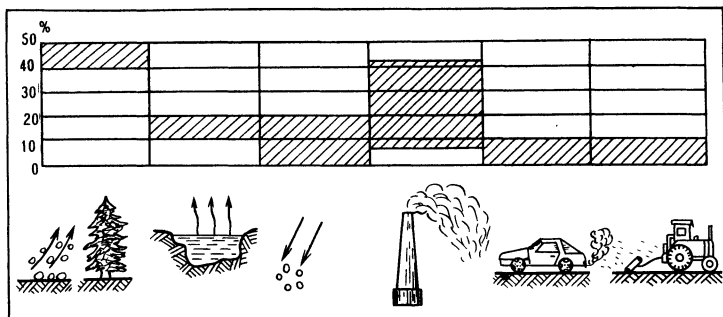
## **ДЖИНН В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

### **ДВАДЦАТИТОННЫЙ ДЖИНН**

Среди различных видов аэрозолей наибольшее значение имеют атмосферные аэрозоли. Ежегодно в расчете на каждый квадратный километр земной поверхности образуется 20 тонн аэрозольных частиц. Если бы это количество аэрозолей сохранялось в воздухе и накапливалось, то воздух планеты превратился бы в сплошной смог и дышать можно было бы только через противогаз. Но в том и состоит особенность природных процессов, что в известных пределах возможно самоочищение воздуха Земли — существует естественный круговорот атмосферных аэрозолей.

На рисунке показаны основные источники атмосферных аэрозолей. Большая часть их образуется естественным путем: почвы и растительный мир дают свыше 40%, водная поверхность 10—20%, космическая пыль — до 20% всех атмосферных аэрозолей. Промышленные предприятия вносят 5—45%, а транспорт — до 10% аэрозолей. Другие источники (например, в условиях сельскохозяйственного производства) поставляют не более 10% аэрозольных частиц. Эти цифры средние и ориентировочные; в различных районах Земли доля, приходящаяся на аэрозоли различного происхождения, неодинакова.

Источников аэрозолей очень много — гораздо бо-



### Откуда берутся атмосферные аэрозоли?

льше, чем мы здесь перечислили; о существовании некоторых из них мы порой не подозреваем. Вот несколько примеров. Наружный слой кожи человека примерно за 20 дней обновляется и превращается в аэрозоли. Доля их в домашних условиях составляет всего 0,4%, а в метро она повышается до 10%. Пыль от изнашивающихся материалов, обуви, автопокрышек, при приготовлении пищи и т. д. составляет так называемые бытовые загрязнения. При сгорании различных пород деревьев выделяется от 3,7 до 9,3 кг аэрозольных частиц на тонну древесины. А если учесть, что от лесных пожаров гибнут ежегодно сотни тысяч деревьев, то можно представить себе, сколько при этом поступает в атмосферу газообразных продуктов и аэрозолей.

Особое беспокойство вызывают аэрозоли антропогенного происхождения, образующиеся побочно в результате хозяйственной деятельности человека.

За последнее время Аральское море высохло почти наполовину и продолжает исчезать. На бывшем дне отложились скопившиеся за несколько веков соли. По подсчетам ученых, ветром в Приаралье выносятся примерно до 75 млн. тонн солей, для перевозки которых понадобился бы железнодорожный состав, длиной превышающий расстояние от Бреста до Владивостока. Значительная часть солевых выносов превращается в аэрозоли.

Атмосферные аэрозоли могут образовываться при выполнении различных сельскохозяйственных работ. Впоследствии мы остановимся на получении и применении пестицидов в виде аэрозолей.

В шахтах, на вскрышных карьерах по добыче полезных ископаемых, около металлургических и химических комбинатов, при работе различного вида агрегатов (дробилок, мельниц, котельных и т. п.), комбикормовых заводов и тепловых электростанций образуются аэрозоли, загрязняющие воздух. Все виды транспорта (наземного, воздушного, речного и морского) являются генераторами аэрозолей за счет неполного сгорания топлива и вследствие движения.

Мировой океан, моря и многочисленные водоемы поставляют в атмосферу водяной пар. В результате конденсации пара возникают облака, которые представляют собой аэрозоли. Общее количество воды на Земле оценивается приблизительно  $10^{18}$  тонн, из них в морях и океанах сосредоточено 94,9%, а в атмосфере в виде паров, тумана и облаков — только 0,001% от общего количества воды. Хотя доля воды в атмосфере незначительна, но она составляет 10 триллионов (т. е.  $10^{13}$ ) тонн, из них  $10^9$  тонн в виде аэрозолей. В водных аэрозолях сосредоточена малая доля — всего  $10^{-7}\%$  от общей массы воды на Земле, но и это примерно в 2,5 раза превосходит количество воды, содержащейся в Байкале. В среднем на  $1 \text{ км}^2$  земной поверхности приходится 200 тонн водяного пара и аэрозолей, содержащих капли воды. Если водяной пар атмосферы сконденсировать, то из него вместе с водными аэрозолями на земной поверхности сформировался бы слой воды толщиной до 2 см.

Дождь, снег, град, туман, роса, изморозь — все эти явления связаны с круговоротом воды в атмосфере. Они очень важны для жизни человека. Между тем знания о природе этих явлений накапливались постепенно, и только совсем недавно, в последние 20—30 лет, появились достоверные сведения о физике облаков, круговороте воды в атмосфере и о других процессах, связанных с атмосферными водными аэрозолями.

### **ОБЛАКО В ШТАНАХ**

Это название поэмы В. В. Маяковского метафорично, как некий образ нежности — «... не мужчина, а облако в штанах!», и в то же время оно содержит определенный физический смысл. Облака, действи-

тельно, имеют своеобразную, порой причудливую и легко меняющуюся форму.

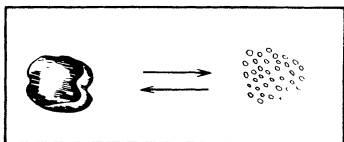
Облака — это совокупность взвешенных в атмосфере капель и ледяных кристаллов, находящаяся на некоторой высоте над поверхностью Земли. Капли и кристаллы воды, как аэрозольные системы, тоже живут — они возникают, растут, перемещаются внутри облака и за его пределы. Жизнь облака завершается испарением капель или выпадением осадков. Необходимым условием образования облаков является пересыщение воздуха парами воды и конденсация паров. Когда давление паров  $P$  становится выше давления насыщения  $P_s$ , т. е.  $P > P_s$ , то наступает пересыщение воздуха, степень которого  $\beta$  равна отношению  $P / P_s$ .

Рождение капель из пересыщенной атмосферы можно наблюдать на крышке чайника или каком-либо другом предмете, который встречается на пути паров кипящей воды. При соприкосновении с предметом, температура которого ниже температуры паров, быстро создается пересыщение паров, что способствует их конденсации и образованию капель.

Пересыщение при образовании облаков связано с притоком паров воды за счет конвективного подъема воздушных масс и вследствие этого с ростом величины  $P$ . Кроме того, по мере удаления от поверхности Земли понижается температура воздуха, вследствие этого снижается давление  $P_s$ . Рост давления паров  $P$  и снижение давления насыщения  $P_s$  приводит к увеличению пересыщения и интенсификации процесса рождения капель. В разреженной атмосфере влажный воздух расширяется, что сопровождается его охлаждением. Типичный пример образования облаков конденсационным способом можно наблюдать летом, когда идет так называемый грибной дождь. Быстрый нагрев воздуха, снижение его плотности позволяют воздушным потокам вместе с водяным паром устремиться вверх. Большой перепад температур по высоте ускоряет этот подъем до тех пор, пока не произойдет конденсация водяного пара.

На образование облаков влияют и атмосферные процессы, которые могут возникнуть внутри однородных воздушных масс в результате изменения атмосферных фронтов при соприкосновении холодного

Что такое сублимация  
и десублимация?



воздуха с теплым. В миниатюре этот процесс можно наблюдать, например, зимой, когда через открытую дверь в атмосферу поступает воздух из нагретого помещения. Воздух быстро охлаждается; давление  $P_s$  резко снижается; возникает пересыщение, образуются капли и даже кристаллики льда.

Пересыщение атмосферы водяными парами — необходимая предпосылка образования облаков. Температура в зоне формирования облаков часто отрицательная, что означает возможность образования из паров воды кристаллов льда. Процесс перехода из газообразного состояния в твердое, минуя жидкое, называется десублимацией. Нетрудно догадаться, что он обратен процессу сублимации, т. е. процессу перехода вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое. Типичный пример сублимации — сушка белья на морозе: влага, находящаяся в белье, замерзает, а уже затем испаряется. Сухой лед (отвержденная углекислота, диоксид углерода) применяют для охлаждения мороженого, особенно летом. Куски сухого льда помещают вместе с продуктом. При извлечении очередной порции мороженого из контейнера вырывается облачко дыма. Это твердые частички углекислоты в теплом воздухе быстро переходят в газообразное состояние, т. е. сублимируются и при этом сами становятся ядрами конденсации по отношению к парам воды, находящимся в воздухе. При образовании облаков из паров воды идут процессы и конденсации, и десублимации. В первом случае облака состоят из капель, а во втором случае, когда температура воздуха низкая, могут сразу возникнуть кристаллики льда. Конденсация и десублимация обуславливают фазовые переходы: пара в жидкость и пара в твердое тело.

В чистом воздухе, при отсутствии загрязнений в виде аэрозолей, водяной пар конденсируется не ранее чем при четырехкратном пересыщении, которое возможно лишь на высоте 10 км. Если бы возникающие в этих условиях облака состояли из льдинок,

создалась бы определенная опасность переохлаждения Земли. Природа позаботилась о себе. Помогают конденсации и десублимации ядра конденсации — агрегаты из молекул или ионов, а также мелкие частички (размером обычно не более 100 нм) соли, получающиеся при испарении разбрызгиваемой ветром морской воды.

Экипаж атомохода «Сибирь» в мае 1987 года во время рейса к Северному полюсу для снятия дрейфующей станции СП-26 наблюдал образование аэрозольей. При торошении льдов в воздух выбрасывались частички, которые превращались в ядра конденсации аэрозольей. Даже в условиях Арктики ядрами конденсации становятся высокодисперсные частицы промышленных выбросов, которые с Большой земли проникают в полярные широты. Ядрами конденсации служат, в частности, мельчайшие капли серной кислоты, частички почвы и высокодисперсные частицы любой природы.

Было замечено, что в прошлом некоторые крупные сражения, в которых использовалось огнестрельное оружие (Бородинское, под Ватерлоо и др.), оканчивались сильными дождями. Они были вызваны ядрами конденсации в виде частичек порохового дыма, образующихся при сгорании черного пороха. В Великую Отечественную войну 1941—1945 гг. пороха было израсходовано неизмеримо больше, чем в эпоху наполеоновских войн, и тем не менее не было зафиксировано прямой связи между количеством израсходованных боеприпасов и выпадением осадков. Дело тут в том, что применяемые пороха были бездымными (главным образом нитроглицериновыми и пироксилиновыми), которые при сгорании не образуют ядер конденсации, в частности оксидов серы и солей металлов.

Присутствие ядер конденсации позволяет парам воды конденсироваться и десублимироваться при значительно меньшей степени пересыщения и даже при неполном насыщении.

В городах и промышленных районах концентрация ядер конденсации значительно больше по сравнению с сельской местностью, что способствует повышению интенсивности осадков на 5—10%.

Облака, подобно свободному джинну, парят в атмосфере. Средняя облачность для Земли оценивается по десятибалльной системе в 5,5 балла, т. е. более половины поверхности земного шара постоянно «опекается» джинном.

Казалось бы, все ясно: как только температура в облаке станет ниже нуля градусов по Цельсию, капли замерзнут и произойдет образование кристаллов льда. Фактически все гораздо сложнее. При отсутствии ядер конденсации вода в облаках может существовать при температуре ниже  $0^{\circ}\text{C}$  и даже при  $-40^{\circ}\text{C}$ . Такое состояние капель в облаках называют переохлажденным.

Когда и при каких условиях из капель образуются кристаллы? Это зависит не только от температуры воздуха, но и от свойств ядер конденсации — их кристаллической структуры, адсорбционных, оптических и других свойств. Все эти факторы действуют в совокупности, поэтому порой бывает трудно предугадать соотношение между парообразным, жидким и кристаллическим состоянием воды в облаке.

В грозовых облаках, например, возникают мощные вертикальные воздушные потоки, максимальная скорость которых (20 м/с) достигается обычно несколько выше середины облака. Этот процесс нередко приводит к резкому пересыщению и переохлаждению, что способствует образованию градин.

Облака образуются на различных высотах в нижней части атмосферы, именуемой тропосферой, главным образом на высоте до 10 км. В отдельных случаях они наблюдаются на больших высотах. Перистые облака верхнего яруса состоят преимущественно из кристаллов. Облака среднего и нижнего ярусов тропосферы (кучевые, перистые, слоистые) содержат в основном капли; однако часто в них наряду с каплями встречаются кристаллы. Серебристые облака, которые появляются в средних широтах летом на высоте 85 км 10—15 раз за сезон, состоят исключительно из кристаллов. Эти облака видны только в сумерки.

Счетная концентрация водяных капель в облаке составляет в среднем 500 в расчете на  $1\text{ см}^3$ . В ледяных облаках кристаллов значительно меньше — один



кристалл приходится на несколько кубических сантиметров. Массовая концентрация воды в облаке равна в среднем  $0,001 \text{ мг/см}^3$  или  $1 \text{ г/м}^3$ , иначе говоря, в одном кубическом километре облака заключена тысяча тонн воды. Учитывая большие размеры облаков, нетрудно подсчитать, что облака несут десятки и даже сотни тысяч тонн воды в виде капель или льдинок. Миллиарды капелек и льдинок обладают огромной поверхностью, граничащей с воздухом, и, следовательно, большим избытком поверхностной энергии. В одном мощном кучевом облаке сосредоточено столько энергии, сколько ее выделяется при взрыве атомной бомбы.

Чем определяется относительная компактность облаков и почему капли воды (вода примерно в 750 раз тяжелее воздуха) не выпадают из облаков? Дело в том, что капли воды в облаках имеют относительно небольшие размеры — их диаметр в основном лежит в пределах от 2 до 40 мкм. Такие капли в спокойной атмосфере оседают со скоростью  $0,012\text{—}1,2 \text{ см/с}$ . Капли диаметром 2 мкм, например, при свободном падении с высоты 1 км достигли бы поверхности земли через 2300 часов.

Такого падения, однако, не происходит, так как капли и кристаллы облаков поддерживаются восходящими потоками воздуха, которые одновременно обеспечивают приток водяного пара и способствуют зарождению новых частиц. Облака перемещаются под действием воздушных потоков. При горизонтальном движении частиц возникают вертикальные составляющие (об этом говорилось ранее), которые препятствуют оседанию капель и кристаллов облаков и обуславливают удержание их во взвешенном состоянии.

Присмотритесь к облакам из иллюминатора самолета; нетрудно заметить, что они плывут, меняют форму, но объем их остается примерно постоянным.

Стабилизации облаков способствуют электрические заряды, которые появляются в результате двух процессов: электризации капель или кристаллов и их разрядов, когда они заряжены разноименно. В конечном счете в облаках могут находиться одноименно заряженные капли, в основном положительно, а напряженность электрического поля может достигать десятков тысяч вольт на метр.

Состояние воды в облаках может привести к некоторым нежелательным последствиям. Так, переохлажденные водяные капли облаков могут замерзнуть на лобовой поверхности крыльев и других частях самолетов, что приводит к обледенению. Обледенение зависит от условий замерзания водяных капель. Если они не растекаются и замерзают в виде отдельных льдинок, то образуется рыхлый слой изморози, удалить который сравнительно легко. При большом количестве водяных капель, которые сливаются и растекаются по поверхности, образуется слой прозрачного или полупрозрачного льда, называемый гололедом. Возможно сочетание изморози с гололедом.

При знаменитых перелетах экипажа В. П. Чкалова (20—22 июля 1936 года над территорией Советского Союза и 18—20 июня 1937 года через Северный полюс в США) из-за обледенения самолета АНТ-25, приведшего к значительному увеличению его массы, возникали критические ситуации, сильно осложнившие полет. В то время скорость подобных самолетов не превышала 300 км/час. Предельная скорость, исключающая обледенение, составляет 600 км/час. Лобовые поверхности современных самолетов, скорость которых гораздо больше, сильно нагреваются вследствие торможения и сжатия воздушного потока, обтекающего самолет. Происходит так называемый критический нагрев, когда температура поверхности превышает температуру замерзания воды даже при полете в облаке, температура которого значительно ниже нуля. Полностью, однако, при большой скорости полета обледенение не исключается, поэтому современные самолеты снабжены еще и мощными средствами, препятствующими обледенению (электронагрев уязвимых мест, химическая защита поверхностей и др.).

### **ДЖИНН ПОРОЖДАЕТ ДЖИННА**

Облакам принадлежит решающая роль в круговороте атмосферной влаги, и не только в этом... Если бы водяной пар не превращался в облако, то оставался бы единственный путь воды на землю — конденсация паров на ее поверхности, т. е. только через росу. Тогда приземный слой воздуха оказался

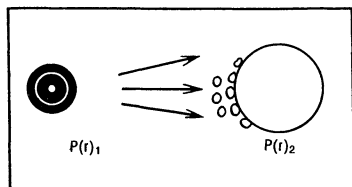
бы пересыщен паром. В такой атмосфере растения не могут испарять влагу и осуществлять перенос воды от корней к листьям. Растительный мир лишился бы возможности поглощать из воздуха  $\text{CO}_2$  и синтезировать органические вещества, что означало бы конец жизни на суше.

Благодаря жидким и твердым осадкам, выпадающим из облаков, влага возвращается на землю. К жидким осадкам, т. е. к аэрозольным системам типа Ж/Г, относится дождь, а твердые осадки, аэрозольные системы типа Т/Г,— это снег, крупа, град. К смешанным осадкам (системы типа Т, Ж/Г) относится снег с дождем, град с дождем, мокрый снег.

В соответствии с признаками аэрозольных систем, перечисленными в начале книги, осадки **в общем** можно рассматривать как аэрозоли. Им присущи основные признаки аэрозольных систем, а именно: примерное постоянство концентрации, способность определенное время (хотя и непродолжительное) находиться во взвешенном состоянии и перемещаться под действием воздушных потоков. Поясним, к чему же относится оговорка «в общем».

Градины величиной с горох и крупные капли грозового дождя в процессе их образования не отвечают признакам, характерным для аэрозолей, и вряд ли их можно назвать аэрозолями. Но, во-первых, не определена точно верхняя граница размеров аэрозольных частиц; во-вторых (это особенно относится к дождю), крупные капли во время полета дробятся и окружены ореолом из мелких капель, явно принадлежащих к аэрозолям.

Облака, как можно было неоднократно убедиться, представляют собой компактную и динамически равновесную систему. Капли и кристаллики находятся во взвешенном состоянии. С ростом размеров капель и кристалликов нарушается стабильность облаков. Достигнув определенных размеров, капли падают на землю,— идет дождь. Поэтому облака следует рассматривать как устойчивые, не способные к оседанию аэрозоли, а осадки — как последствия нарушения этой устойчивости. Джинн (облака) порождает другого джинна (осадки). Существуют внешние и внутренние причины перехода облаков в осадки; к первым относятся атмосферные процессы.



Процесс испарения мелких  
и роста крупных капель

В области низкого атмосферного давления, которая характерна для циклонов, степень пересыщения атмосферы парами воды значительно больше, чем в области высокого атмосферного давления (антициклоны); поэтому вероятность выпадения осадков из циклонического атмосферного фронта весьма велика. Погода, однако, определяется далеко не одним атмосферным давлением, так что полностью полагаться только на этот признак нельзя — можно ошибиться, что нередко случается при пользовании барометром — анероидом, имеющим, помимо шкалы давления, надпись «осадки», «переменно», «сухо» и т. д.

В атмосфере протекает множество процессов, к тому же они очень изменчивы. Даже специалисты порой не могут их предусмотреть. В этом мы убеждаемся, когда вместо обещанной солнечной погоды вынуждены спасаться от проливного дождя, и наоборот.

Внутри облаков — своя жизнь. Даже при отсутствии внешних причин в самих облаках возникают условия для образования дождя. В облаках разыгрывается своеобразная борьба за существование. Капли и кристаллы более крупных размеров «пожирают» своих более мелких собратьев. У неодинаковых по размеру капель или кристаллов неодинаковая кривизна поверхности, что, в свою очередь, сказывается на величине упругости паров над ними.

Давление пара, при котором происходит конденсация (или десублимация), зависит от радиуса капли (кристалла); оно экспоненциально возрастает с уменьшением радиуса капли. Это означает, в частности, что над каплей вдвое меньшего радиуса при той же температуре равновесное давление пара будет в 7,4 раза выше, чем над каплей вдвое большего радиуса. Водяной пар будет насыщен относительно

мелких частиц [ $P(r)_1 = P_s$ ], где  $P_s$  — давление насыщенного пара] и пересыщен по отношению к крупным каплям [ $P(r)_2 > P_s$ ]; пересыщение неизбежно приведет к конденсации и снижению давления пара. В результате произойдет испарение мелких капель и конденсация пара на крупных каплях, мелкие капли становятся еще меньше и в конечном счете исчезают. Крупные капли еще более укрупняются. Подобный процесс, который происходит самопроизвольно, называют изотермической перегонкой.

Изотермическая перегонка происходит и с кристаллическими частицами. Она обуславливает рост кристаллов льда при температуре ниже  $0^\circ\text{C}$  за счет исчезновения относительно мелких кристалликов. Давление пара над каплями воды будет больше, чем над кристаллической льдинкой; поэтому пар будет ненасыщенным по отношению к водной поверхности и пересыщенным по отношению к поверхности кристалла. Иными словами, одна и та же концентрация пара по отношению ко льду будет пересыщенной, т. е. в избытке, а по отношению к воде — в недостатке. В результате переохлажденные капли воды испаряются, а кристаллики льда укрупняются. Это приводит к росту льдинок и к исчезновению мелких капель. Льдинки растут до тех пор, пока не начнут оседать; они захватывают капли воды, выпадают из холодной зоны и в определенных условиях (летом, весной и осенью) превращаются в капли дождя.

В начальной стадии образования облаков капли имеют небольшие размеры (средний диаметр капель слоистых облаков может составлять 9, а кучевых — 14,5 мкм). Пересыщение приводит к росту диаметра капель. Вследствие изотермической перегонки их размер увеличивается в сотни раз; создаются предпосылки для слияния капель, дальнейшего их укрупнения и формирования осадков. Размер капель дождя в облаке в момент их первоначального образования и капель дождя, достигающих поверхности земли, не одинаков. Крупные капли дробятся на более мелкие, на своем пути сливаются с другими каплями. Относительно мелкие капли не успевают долететь до земли и испаряются. Происходит исчезновение мелких капель, появление более крупных, а также их дробление и последующее укрупнение за счет слияния.

При обложном дожде капли воды у поверхности земли обычно имеют размеры от 100 до 800 мкм; в морозящих дождях их максимальный диаметр снижается до 250 мкм. Средняя скорость падения капель дождя примерно 8—12 м/с. Если принять объем капель равным примерно 0,3 мл, то при такой скорости падения энергия капель может составить 0,02 Дж. Это не мало, но при ударе дождевой капли ее энергия расходуется в основном на деформацию и дробление на более мелкие капли. Другое дело — удар градины. Прочность кристаллической решетки льда при 0°С — около 340 Дж/г. Пока это значение не достигнуто, энергия удара градины будет расходоваться на деформацию препятствий: град срывает листья, режет стебли, уничтожает посевы; более крупные градины в состоянии разбить стекла и даже оставить вмятины на корпусе автомобиля.

Твердые осадки в виде кристаллов, т. е. снег, характеризуются большим разнообразием форм, наиболее простые из них — иглы, столбики и пластины. Размеры снежинок неодинаковы. Наибольший размер имеют игольчатые звезды, вырастающие иногда до 10 мм.

### **МОРОЗНОЙ ПЫЛЬЮ СЕРЕБРИТСЯ...**

Как вы помните, морозной пылью серебрился бобровый воротник онегинской шубы. Эта морозная пыль — не что иное, как иней, а точнее слой мелкокристаллического льда, который образуется путем десублимации водяных паров, т. е. при переходе их в твердое кристаллическое состояние. В отличие от рассмотренного ранее процесса формирования облаков, образование инея происходит при соприкосновении нагретого воздуха с холодными предметами в зимнее время.

Выдыхаемый воздух имеет температуру значительно бóльшую, чем окружающая среда; к тому же этот воздух сильно увлажнен. Поэтому содержащиеся в нем пары воды на морозе быстро переходят в твердое состояние и осаждаются на близлежащих холодных предметах. Таким предметом, в частности, и стал бобровый воротник, ворсинки которого имеют большую поверхность; усы, борода или отвороты

меховых шапок, ветки деревьев (их поверхность шероховата) не составляют исключения, и в сильные морозы иней преобразует все вокруг — и людей, и деревья.

В Арктике и Антарктиде, когда температура порой опускается ниже — 50 °С, пары воды в выдыхаемом человеком воздухе мгновенно превращаются в ледяные кристаллики, которые оседают на одежде и образуют иней. В морозную погоду при солнечном освещении наверняка вам приходилось наблюдать и «искрящийся» воздух. Это тот же иней в аэрозольном состоянии, т. е. взвешенные в воздухе мельчайшие кристаллики льда.

Туманы, как и облака, вызваны скоплением продуктов конденсации водяного пара (т. е. его пересыщением), но только непосредственно у земной поверхности. Туманы чаще бывают осенью, когда после первых холодов могут возвращаться теплые массы воздуха и воздух у поверхности земли будет холоднее, чем в верхних слоях. Появлению туманов (как и облаков) способствуют ядра конденсации. Итак, туманы образуются в результате конденсации влаги охлажденного воздуха в условиях пересыщения атмосферы водяным паром и при наличии ядер конденсации. Но причиной появления тумана может стать и усиленное испарение влаги с нагретой водной поверхности (река, озеро), температура которой на 10 и более градусов превышает температуру воздуха. Подобные туманы в средних широтах обычно бывают рано утром, вечерние туманы чаще формируются в лощинах.

Туманы охлаждения могут быть продолжительными. В октябре 1987 года на редкость устойчивые туманы над Москвой и некоторыми другими городами Европейской части СССР парализовали работу авиационного транспорта более чем на неделю.

Между тем туманы в Москве не столь уж редки: в среднем до 26 ежегодно. Конечно, это не сравнимо с лондонскими туманами, когда зимой до десяти дней в месяц жители проводят в туманном облаке. В некоторых местностях туманы могут определять характер погоды на довольно продолжительное время. Поселения в Забайкалье, за Полярным кругом, например, обычно располагаются в долинах межгорных впадин,

где скапливается самый холодный воздух. Дым печных труб и топок, выбросы предприятий являются своеобразными ядрами конденсации паров воды. Поэтому с ноября по март над этими поселениями висят туманы. Туманное море на высоте 50—100 м от земли нарушает видимость, затрудняет работу наземного транспорта и авиации. Кроме того, воздушные взвеси осаждаются на крышах, стенах, проникают всюду, куда только могут проникнуть, в том числе в легкие людей, вызывая различные недуги.

Туманы могут образовываться не только в приземном слое. За самолетом, летящим в безоблачную погоду на большой высоте, обычно тянется белый след. При сжигании топлива в авиационном двигателе образуется большое количество паров воды, которые попадают вместе с выхлопными газами в холодную атмосферу. Резкий перепад температуры приводит к пересыщению атмосферы парами воды, конденсации этих паров и образованию капелек тумана, формирующих след самолета — своеобразную трассу его полета.

Туманы помогают противостоять заморозкам. При их помощи можно повысить температуру приземного слоя воздуха на 4 градуса. Заморозки прихватывают поля, огороды, сады, они губительны для посевов. Рыхлая земля сельскохозяйственных угодий имеет большое поровое пространство, заполненное воздухом, и обладает небольшой теплопроводностью. Поэтому верхний слой успевает замерзнуть.

Небольшие грядки можно прикрыть полимерной пленкой; ею, однако, трудно защитить кустарники, деревья и большие посевные площади. Часто для защиты от заморозков разводят костры. Обогреть землю таким образом невозможно, но образующаяся дымовая завеса отражает тепловое излучение почвы, сохраняя ее тепло. Твердые частицы дыма служат еще и ядрами конденсации, заставляя пары воды конденсироваться в туман и отдавать также свое тепло, которое дополнительно нагревает землю.

Говоря об облаках и атмосферных осадках, мы не затрагивали существа атмосферных процессов, о сложности и многообразии которых свидетельствует то обстоятельство, что влага в атмосфере обновляется в среднем 42 раза в год, т. е. ежегодно 42 раза вода



возвращается из атмосферы на землю, с тем чтобы снова перейти с земли в атмосферу.

### **ПОГОДА ПО ЗАКАЗУ**

Погода непосредственно влияет на производительную деятельность людей. Обильные продолжительные дожди, равно как и их длительное отсутствие одинаково вредны для сельскохозяйственных угодий. Град в южных районах нашей страны особенно опасен для виноградников и цитрусовых плантаций.

Можно ли изменить погоду по заказу? Да! В известных пределах доступными средствами можно предотвратить или вызвать осадки, исключить градообразование.

Накануне открытия XII Всемирного фестиваля молодежи и студентов 26 июля 1985 года в Москве шел сильный дождь, а 27 июля, в день открытия фестиваля, стояла прекрасная солнечная погода. Помимо благоприятных метеорологических условий помог самолет «АН-300 М» экспериментально-производственной лаборатории Моссовета, который за шесть часов выпустил в небо Подмосковья сотни метеопатронов и сбросил около трех центнеров гранулированной углекислоты.

Путем введения в облака специальных веществ ускоряются процессы конденсации и десублимации паров воды, а вводимые вещества выполняют роль хладоагента или центров кристаллизации (десублимации). Типичным хладоагентом является твердая углекислота ( $\text{CO}_2$  — диоксид углерода), которая имеет низкую температуру сублимации ( $-79^\circ\text{C}$ ).

Мы уже упоминали, что твердый сухой лед сразу переходит в газообразное состояние (напомним, что этот процесс называется сублимацией). Пары углекислоты в холодном воздухе инициируют другие процессы — конденсацию и десублимацию паров воды, что приводит к образованию в облаках новых капель и кристаллов. В конце концов происходит разрушение облаков; иными словами, аэрозольный джинн загоняется в бутылку — атмосферная влага облаков возвращается на землю в виде дождя.

До сухого льда в качестве ядер конденсации сначала применяли более дорогостоящий препарат —

иодид серебра  $\text{AgI}$ , кристаллы которого, подобно кристаллам льда, имеют гексагональное строение. Наиболее эффективными оказались кристаллики размером 100 мкм. Один грамм иодида серебра способен создать  $10^{12}$ — $10^{16}$  центров кристаллизации и соответственно такое же число капель воды и ледяных кристаллов. В результате изотермической перегонки из-за разности давления насыщенного пара происходит испарение капель облаков и рост кристаллов. При помощи иодида серебра удавалось «заморозить» облака (перевести все капли в кристаллы), а вызвать осадки далеко не всегда. Порой даже трудно определить, пошел ли дождь сам по себе или вызван искусственно.

Кристаллическая структура вводимых элементов — важное, но не единственное условие, определяющее десублимацию. Для конденсации и десублимации помимо иодида серебра оказались эффективными и некоторые другие вещества, причем не только кристаллические.

Кроме реагентов, образующих ядра конденсации, стимулировать выпадение осадков могут гигроскопические ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ) и поверхностно-активные вещества (ПАВ). Гигроскопические вещества понижают упругость пара над каплями, ускоряют конденсацию, рост капель и начало коагуляции, т. е. слипание капель. ПАВ снижают поверхностное натяжение воды и упругость насыщенных паров, также способствуя тем самым конденсации и коагуляции.

Искусственный дождь не только обеспечивает хорошую погоду, он способен на большее. Он может действовать как своеобразный гигантский атмосферный водопровод для полива посевов и даже для тушения лесных пожаров. Над пылающим лесом аэрозоли продуктов горения становятся ядрами конденсации паров воды. В результате нередко лесные пожары сопровождаются появлением кучевых облаков. Засеивая их химическими реагентами, можно вызвать искусственный дождь. Летом 1979 года во время лесных пожаров в Иркутской области самолет «АН-26» «расстреливал» облака ракетами, стимулируя выпадение дождя, погасившего пламя пожара. Универсальным считать этот метод тушения лесных пожаров, однако, нельзя, так как облака образуются

не над каждым очагом пожара. (Кстати, по прошествии пяти лет разгорелся спор, связанный с публикацией в журнале «Огонек» о том, что солнечная погода во время фэстиваля молодежи — это дар природы, а отнюдь не творение рук человеческих.)

Все же попытки вызвать дождь искусственно путем рассеивания реагентов в большинстве случаев оканчиваются результативно, чего нельзя сказать в отношении туманов. Капли тумана укрупняются, и видимость улучшается только в местах рассева реагентов. Образующийся коридор просветления затем затягивается новой порцией капель тумана. Именно такой процесс имел место в октябре 1987 года во время туманной недели в Москве, когда была сделана попытка увеличить видимость над московскими аэропортами. Открыть аэропорты удалось только на три часа.

Действие вводимых реагентов зависит от состояния атмосферы, которое порой бывает неустойчивым, как, например, в тех случаях, когда в атмосфере имеется пересыщенный пар и переохлажденная воды. При конденсации и десублимации выделяется тепло, которое передается атмосфере и вызывает вторичные процессы — испарение одних и рост других капель, образование осадков. Вертикальное (за счет подъема теплого воздуха) и горизонтальное (вызванное различным атмосферным давлением) перемещение воздушных масс нарушает тепловое равновесие, может стимулировать или предотвращать действие реагентов, и порой заказ на изменение погоды остается невыполненным.

### **ЖИВАЯ ПЫЛЬ**

Согласно арабскому фольклору, джинн — это существо, наделенное разумом и способностью чувствовать. Аэрозоли неодушевленны. Однако в пещерах предгорья хребта Кугинтангтау (Красноярский край) спелеологи обнаружили «живую» пыль — шевелящийся слой осевших на стенках пещеры микроскопических полупрозрачных клещей. Это не единичный случай; часть атмосферных аэрозолей, всего  $10^{-6}\%$  от общего количества, состоит из вирусов, бактерий, спор, пыльцы растений и др. Помимо живых микро-

организмов в атмосфере могут находиться и их «трупы».

Можно с полным основанием говорить о живой фракции атмосферных аэрозолей. Их доля в общем балансе атмосферных аэрозолей ничтожна, однако влияние на жизнь и деятельность различных живых и растительных организмов огромно. Эти аэрозоли обеспечивают размножение растений и грибов; они могут вызвать болезнь людей, животных и растений.

Живая фракция атмосферных аэрозолей является предметом изучения специальной науки — аэромикробиологии, а биологические объекты, которые находятся в аэрозольном состоянии, объединяются общим названием — аэропланктон.

Аэропланктону принадлежит существенная роль в жизни флоры и фауны. Ветровое опыление дает жизнь многим растениям. Возможность попадания аэрозолей в виде пыльцы на пестик цветка незначительна, но частичек пыльцы множество, и поэтому цветы опыляются. Некоторые виды растений образуют громадное число спор. Один экземпляр гигантского дождевика, например, дает  $7 \cdot 10^{10}$  спор. Чрезвычайно велика способность к образованию спор у мхов и папоротников. Обыкновенная сосна поставляет в среднем  $6,5 \cdot 10^9$  пыльцевых частичек, а годовая аэрозольная производительность ее достигает 0,12 кг.

Генерация аэрозолей растениями происходит по мере созревания пыльцы. Природа позаботилась о том, чтобы предотвратить преждевременный переход в аэрозольное состояние еще не созревшей пыльцы. У некоторых растений пыльца развивается в коробочках, и образование аэропланктона возможно только после того, как они раскроются.

Было бы ошибочным считать, что любое образование аэрозолей растениями представляет собой живой аэропланктон. Сосновые иглы, например, имеют довольно острые концы, покрытые воском. Между поверхностью земли и верхушками сосен, как и любых высоких предметов, существует разность электрических потенциалов, которая вызывает тихий электрический разряд. Этот разряд уносит с кончиков сосновых игл небольшие кусочки воска. Они образуют аэрозоли растительного происхождения, не являющиеся аэропланктоном.

В аэрозольном состоянии микроорганизмы аэропланктона не размножаются, а под действием различных факторов (света, повышенной температуры и др.) часть из них погибает. Разнообразны формы и размеры частиц аэропланктонов. Подавляющее большинство грибковых спор имеют овальную или сферическую форму. Диаметр частиц аэропланктонов колеблется в широких пределах — от 0,01 мкм (вирусы) до 100 мкм (споры мхов и папоротников). Относительно крупные частицы, как правило, не слипаются с другими частицами. Незначительные по размеру бактериальные клетки, напротив, чаще всего находят пристанище на поверхности пылинки, капельках слюны и других аэрозольных частицах.

Формирование аэропланктона начинается в приземном слое. Вот пример, знакомый почти каждому. Отцветшие солнечно-желтые корзинки одуванчика, превратившись в пушистые белые шарики, под слабым дуновением ветра выбрасывают в воздух уйму крошечных парашютиков; эти плоды, именуемые семянкой, по воздуху перемещаются на далекие расстояния. Особенно интенсивно сдувание сухих спор, например спор плесневых и головневых грибов.

У поверхности земли скорость ветра небольшая, поэтому какая-то доля частиц оседает, но все же довольно значительное количество живой пыли выносится за пределы приземного слоя. При определенных условиях аэропланктон вместе с другими частицами способен преодолевать большие пространства, сохраняя при этом жизнеспособность. Пыльцу елей и сосен, например, обнаружили на берегах Гренландии, на расстоянии 600—1000 км от ближайших сосновых и еловых лесов. Споры стеблевой ржавчины пшеницы переносились на расстояние более 1000 км.

Итак, в природе все взаимосвязанно: джинн в виде живой фракции аэрозолей, не обладая разумом, активно участвует в жизнедеятельных процессах.

### **ПОЗЕМКА И ВЕТРОВАЯ ЭРОЗИЯ, БУРАН И ПЫЛЬНЫЕ БУРИ**

Выше мы рассмотрели облака и туманы, атмосферные осадки и аэропланктон. Большая часть атмосферных аэрозолей (до 50%) генерируется, одна-

ко, земной поверхностью. Они порождаются локальными источниками и существуют сравнительно непродолжительное время — от нескольких минут до нескольких дней, и лишь в редких случаях до десятка дней. Подобные аэрозоли находятся в приземном слое — аэрозольный джинн еще не в состоянии оторваться от своего источника.

В формирование приземного слоя аэрозолей вносят свою лепту все виды транспорта. Особенно «отличаются» автомобили. После проезда по проселочной дороге в летнюю сухую погоду пыль буквально поднимается столбом. Специалисты подсчитали, что в среднем с каждых 20 метров проселочных дорог ежегодно в воздух переводится тонна пыли. К счастью, эта пыль остается в приземном слое и быстро оседает.

Та же участь кратковременного пребывания в атмосфере ожидает капли воды, образующиеся над акваториями вследствие штормов, морских прибоев, а также на водопадах и речных перекатах. Эти и другие явления способствуют дроблению воды на капли и переводу их во взвешенное состояние. Исчезновению капель из атмосферы помимо их оседания способствует еще и испарение воды.

Особенности образования аэрозолей в приземном слое прослеживаются в таких явлениях, как поземка и ветровая эрозия. Причина этих двух явлений природы одна и та же: под воздействием ветра происходит образование аэрозолей в приземном слое. В случае поземки в аэрозольное состояние переходят снежинки снежного покрова, а при ветровой эрозии — верхний слой почвы.

Ветровая эрозия в пустыне приводит к образованию облака песка высотой менее двух метров с резко очерченной верхней границей, скользящей над землей подобно ковру. Головы всадников могут подниматься из этого облака, как из воды в плавательном бассейне. Своеобразную ветровую эрозию можно наблюдать в условиях города, когда порывы ветра захватывают пыль и мусор с проезжей части и тротуаров, образуя пылевые вихри.

Частицы, переведенные во взвешенное состояние, подхватываются воздушным потоком и перемещаются вместе с ним. При скорости выше 20—30 м/с

(примерно 70—100 км в час) ветер уже обладает большой разрушительной силой, поземка переходит в бурю, а ветровая эрозия — в пыльные бури. С увеличением скорости ветра джинн вырывается на свободу.

Ветровая эрозия, пыльные бури уносят верхнюю наиболее плодородную часть почвы и часто приносят ощутимый вред сельскому хозяйству. Ветровая эрозия в первую очередь затрагивает разрыхленный слой, частицы которого связаны друг с другом слабыми силами. Именно поэтому легче выдуваются песчаные почвы. К образованию пыли склонны глинистые (пылевидные) грунты.

Черноземные почвы, а также плотные глинистые, лёссовые или латеритные почвы подвергаются ветровой эрозии тогда, когда их масса предварительно измельчена, например в результате вспашки и боронования. Причем эрозия, а затем и пыльные бури тем выше, чем протяженнее сплошные распаханное пространство. Поэтому впервые с сильными пыльными бурями встретились земледельцы, распашавшие степи США и Канады. Вспашка больших площадей в степной полосе тоже привела к сильной ветровой эрозии и возникновению пыльных бурь. В результате пыльных бурь образуются пылевые облака, которые могут подниматься на несколько километров от поверхности земли.

В черноземных степях Украины, Нижнего Поволжья и Северного Кавказа пыльные бури, которые в этих местах стали частыми, называют черными. Тучи пыли заслоняют солнце, и днем становится темно, как ночью.

Наиболее разрушительной была пыльная буря в апреле 1928 года в степных и лесостепных областях Украины. Ветер сорвал слой грунта толщиной до 15 мм с площади, которая примерно в четыре раза превышает территорию Великобритании. Высота пылевого облака достигала 500 метров. Черноземная пыль была перенесена на запад и осела на огромной территории Прикарпатья, Румынии и Польши. Чаше всего пыльные бури бывают весной (март — май), но не исключено их появление в любое время года. Случаются пыльные бури на полях США, Канады, Австралии и других стран. Укрощение ветра, в част-

ности при помощи лесозащитных полос, безотвальная пахота и другие способы возделывания и укрепления почвы и грунта в значительной степени противодействуют возникновению пыльных бурь и снижают их пагубные последствия.

Если в земных условиях для укрощения пыльного джина применяют ряд действенных мер, то пыльные бури в атмосфере других планет возникают стихийно и так же стихийно прекращаются. Особенно значительные пыльные бури наблюдались в атмосфере Марса. Еще во время полета межпланетных станций «Марс» и «Маринер» в конце 1971 года и в начале 1972 года создалась уникальная возможность сопоставить марсианские пыльные бури с земными. Кроме локальных пыльных бурь на Марсе наблюдались и глобальные, которые повторялись один — два раза в год.

Атмосфера Марса постоянно (и притом сильно) запылена. Повышенная концентрация аэрозолей обуславливает светло-оранжевый цвет марсианского неба. Частицы марсианского грунта при пыльных бурях поднимаются на 30, а то и на 60 километров от поверхности планеты, т. е. значительно выше, чем при земных пыльных бурях. На Марсе скорость ветра, превращающего частицы грунта в аэрозольную систему, равна от 30 до 60 м/с, т. е. больше, чем на Земле. Предполагают, что размер частиц, которые попадают в атмосферу Марса во время пыльных бурь, составляет от 10 до 300 мкм.

Отличия марсианских пыльных бурь от земных объясняется тем, что на Марсе ниже плотность атмосферы и потенциал тяготения. Поэтому пыльные бури на Марсе практически распространяются по всей планете и оказывают существенное влияние на погоду и климат планеты в целом, а не отдельной ее области. Облака пыли поглощают часть солнечной радиации, что способствует охлаждению поверхности планеты и росту температуры марсианской атмосферы.



## **В ОДНУ И ТУ ЖЕ РЕКУ НЕЛЬЗЯ ВОЙТИ ДВАЖДЫ**

Это известное изречение, которое принадлежит древнегреческому философу Гераклиту, можно с полным основанием отнести к атмосферным аэрозолям. Аэрозоли все время изменяются, дважды не повторяя себя. В бесконечном процессе обновления наблюдается, однако, определенная закономерность. Она прежде всего проявляется в последовательности расположения аэрозольных слоев в атмосфере.

Атмосфера — это газовая оболочка Земли. Основная масса атмосферного воздуха сосредоточена в ее нижней части до высоты примерно 20 км, хотя состав воздуха изменяется лишь на высоте более 90 км.

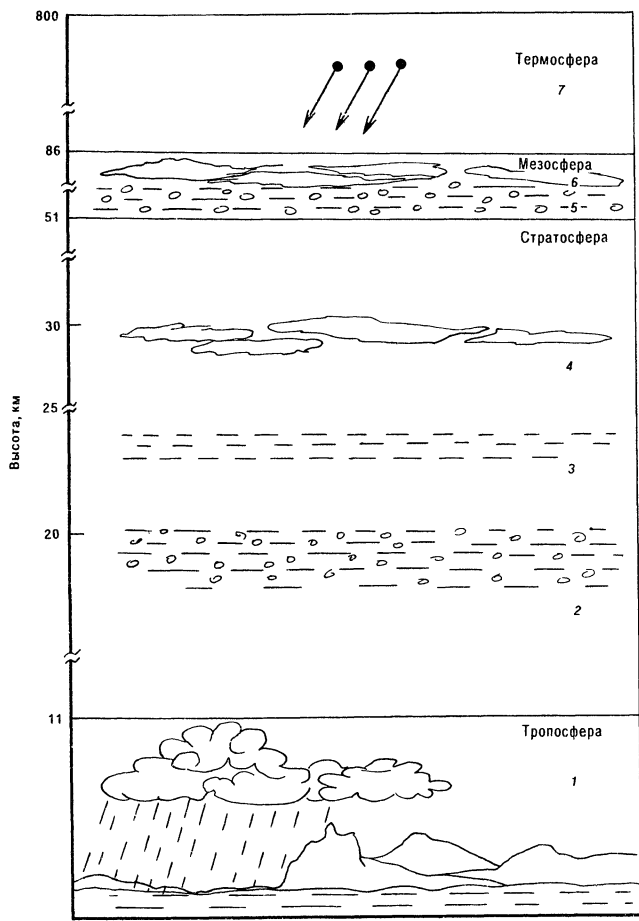
Ближайшая к земной поверхности часть атмосферы называется тропосферой. Высота тропосферы в полярных широтах составляет 8—10 км, а у экватора — 16—18 км. В тропосфере температура воздуха уменьшается на 6 градусов в расчете на 1 км и происходит интенсивное турбулентное перемешивание воздушных масс. Большинство аэрозольных частиц живет в тропосфере от нескольких дней до нескольких месяцев. Основная причина исчезновения аэрозольных частиц — вымывание их дождем и оседание, а также вертикальное перемещение воздуха.

Время жизни аэрозольных частиц в тропосфере зависит от размеров этих частиц: так, частицы диаметром более 10 мкм находятся в этой среде не свыше 5 дней, за это время под действием ветра они могут переместиться на 300—350 км. Между тем спутниковые наблюдения показывают, что при отсутствии осадков аэрозоли распространяются на тысячи километров от источника. Это свидетельствует о наличии частиц диаметром менее 10 мкм, которые оседают медленно и сосредоточены преимущественно в верхних слоях тропосферы.

Время существования частиц в стратосфере, следующем за тропосферой слое воздуха, в котором отсутствует вымывание аэрозольных частиц осадками и вертикальное перемещение воздуха, может достигать нескольких лет.

В стратосферу проникают в основном высокодисперсные аэрозоли. Их сульфатный компонент состав-

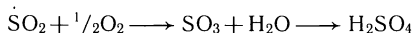
ляет примерно 50%. Аэрозоли сульфатного происхождения формируются из молекул диоксида серы (сернистого газа  $\text{SO}_2$ ). Вступая в реакцию с атмосферным кислородом, он образует триоксид серы (серный ангидрид), который с парами воды дает серную



Наиболее характерные аэрозольные системы в атмосфере Земли

1 — облака (кучевые, перистые, грозные); 2 — первый слой Юнга (18—20 км), 3 — озоновый слой (20—25 км), 4 — перламутровые облака (28—30 км), 5 — второй слой Юнга (60—80 км), 6 — серебристые облака (80—82 км), 7 — космические частицы

кислоту. Реакции идут в следующей последовательности:



Содержащие серу аэрозоли образуются также из сульфида аммония и родственных ему соединений, а также солей серной кислоты, некоторых сероорганических соединений и кристаллического углерода. Значительная часть аэрозолей, состоящих из серной кислоты, сосредоточена в стратосфере на высоте 18—20 км, в так называемом слое Юнга.

Помимо частиц сульфатного происхождения до 40% высокодисперсных аэрозолей стратосферы приходится на органические вещества в виде выделений растений, промышленных выбросов и выхлопов автомобилей, а также производных терпенов и других ароматических соединений.

Аэрозольные частицы в стратосфере окружены молекулами газа и за счет поступающих новых порций могут расти со скоростью один молекулярный слой в неделю. Превратившись в «переростков», они теряют способность витать и постепенно оседают со средней скоростью 1 км в год.

Особую роль в формировании атмосферных аэрозолей играет озон. У земной поверхности озона немного — всего 0,02 части на миллион частей воздуха. В пятьсот раз больше озона (10 частей на миллион частей воздуха) сосредоточено в озоновом слое. Зона максимальной концентрации озона лежит на высоте около 20—25 км. Положение максимума и условные границы слоя озона могут «плавать» с амплитудой до 5 км.

Если все количество озона сконцентрировать при так называемых нормальных условиях (0 °С, давление 760 мм ртутного столба) и равномерно распределить над поверхностью земли, то всего наличного в атмосфере озона хватило бы на слой средней толщиной около 3 мм. Эту величину называют приведенной толщиной озонового слоя. Слой озона такой толщины эффективно ослабляет жесткое (т. е. коротковолновое) ультрафиолетовое излучение Солнца, которое не менее опасно для всего живого на Земле, чем радиоактивное излучение. Озоновый слой регулирует температуру атмосферы.

Озоновый слой, роль которого так велика, очень уязвим. Он способен разрушаться под действием различных факторов. Если приведенная толщина озонового слоя снизится с 3 до 2 мм, т. е. в 1,5 раза, это вызовет повышение интенсивности солнечного ультрафиолетового излучения у поверхности Земли в  $10^{13}$  раз. Именно такое утончение озонового слоя было зафиксировано над Антарктидой весной 1985 года. Два года спустя там же толщина озонового слоя сократилась до минимальных размеров и составила 1,1 мм, а интенсивность ультрафиолетового излучения возросла в  $10^{25}$  раз. Заговорили об атмосферной «озоновой дыре», которая через некоторое время «заплывает», но с годами все же растет и сохраняется более продолжительное время.

Фторхлоруглероды жирного ряда вносят свою лепту в разрушение озонового слоя. Их применяют в аэрозольных упаковках в качестве распылителей. Сами по себе они вполне инертны и безобидны. Но будучи распыленными в воздухе (т. е. перейдя в аэрозольное состояние; вот он, джинн, вырвавшийся на свободу), они в конце концов достигают верхних слоев атмосферы; там они подвергаются фотохимическому воздействию, разлагаясь с выделением атомов хлора (он-то и взаимодействует с озоном). «Помогают» уничтожению озонового слоя и хладагенты холодильных установок. Кроме того, часть озонового слоя «съедают» оксиды азота, которые образуются и в выхлопных газах двигателей самолетов, и после сжигания топлива, и при применении азотных удобрений.

Обработка систематических наблюдений, проводимых с 1979 года, показала, что за 10 последующих лет приведенная толщина озонового слоя убавилась в среднем по разным широтам на 5%. Если такими темпами будет происходить дальнейшее разрушение озонового слоя, то к началу следующего столетия истощение его достигнет 10%. Этот пример еще раз показывает, как сложны и порой тесно взаимосвязаны явления в природе; неучет этих связей может привести к необратимым пагубным последствиям.

Сейчас настало время, когда от констатации фактов пагубного влияния на природу перешли к принятию действенных мер по предотвращению этого влияния. Примером тому служит Междуна-

родная Конференция по фторхлоруглеродам, которая состоялась в марте 1989 года в Лондоне. Представители более 100 стран разработали практические мероприятия, предусматривающие сокращение на 50% выпуска фторхлоруглеродов к концу столетия.

Вернемся к характеристике атмосферных аэрозолей. На высоте 25—30 км время от времени над северной Атлантикой и скандинавскими странами наблюдаются так называемые перламутровые облака. Свое название они получили из-за красивой переливающейся окраски. Эти облака видны преимущественно ночью. Счетная концентрация в них незначительна и составляет всего несколько частиц на 1 см<sup>3</sup>. Облака состоят из кристалликов воды. Хотя их мало, но кристаллическая поверхность обладает повышенной способностью отражать и преломлять солнечные лучи, что и обуславливает окраску перламутровых облаков.

Состав аэрозолей, которые группируются в облака и слои, более или менее постоянен. Это не означает, однако, что подобное постоянство обеспечивается одними и теми же частичками. Напротив, постоянно исчезают одни и возникают другие частицы, т. е. дважды состав аэрозолей не повторяется.

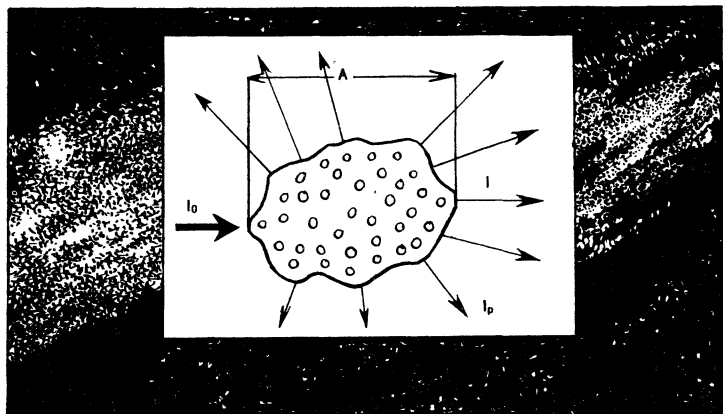
Помимо рассмотренных, в различных местах земного шара в зависимости от наличия промышленных предприятий, особенностей населенных пунктов и местности, а также других условий, образуются «свои» аэрозоли. Эти локальные атмосферные аэрозоли (в отличие от тех, из которых состоят облака и аэрозольные слои) более или менее постоянного состава, формируются из местных источников. Все, что поступает от них в атмосферу и способно покинуть приземный слой воздуха, превращается в аэрозоли. Города и поселки, фабрики и заводы, леса и пастбища, посевы и всходы, реки и моря — эти и многие другие «родители джинна» могут быть поставщиками «своих» аэрозолей.

#### **«ВЕЩИ ОТ СГУЩЕНИЯ СВЕТА ВИДЕТЬ МОЖНО. . .»**

На эти слова нашего великого соотечественника М. В. Ломоносова обратил внимание советский ученый Б. В. Дерягин\*. Речь идет о мельчайших

---

*Дерягин Б. В. Аэрозоли. М.: Знание, 1961 31 с.*



Свет, проходя через аэрозольное облако, ослабляется и рассеивается

пылинках, которые «очень видны, как они по сей светлой дорожке плавают, когда глаз из темного места на них смотрит». Цитата отражает одно из самых распространенных оптических явлений, которое вызвано рассеянием света мельчайшими аэрозольными частицами. Дым, туман, облака, окраску неба, восход и заход солнца и многие другие процессы и явления мы видим вследствие оптических свойств аэрозолей.

Под оптическими свойствами подразумевают способность аэрозолей изменять направление, интенсивность и длину волны световых лучей. Каждая аэрозольная частица может рассеивать, преломлять и отражать свет. Кроме того, аэрозольные частицы вызывают дифракцию, т. е. огибание частиц лучами света. Эти оптические свойства зависят от природы и размеров частиц. Аэрозоли состоят из многих частиц. Оптические свойства отдельных частиц и аэрозольного облака не идентичны, поскольку в облаке происходят вторичные процессы, связанные с усилением либо со снижением суммарного воздействия световых лучей на все аэрозольные частицы. Поэтому оптические свойства определяются уже не свойствами отдельных частиц, а аэрозолем в целом. Они зависят помимо природы частиц от концентрации частиц, размеров аэрозольного облака и расположения частиц относительно границ этого облака.

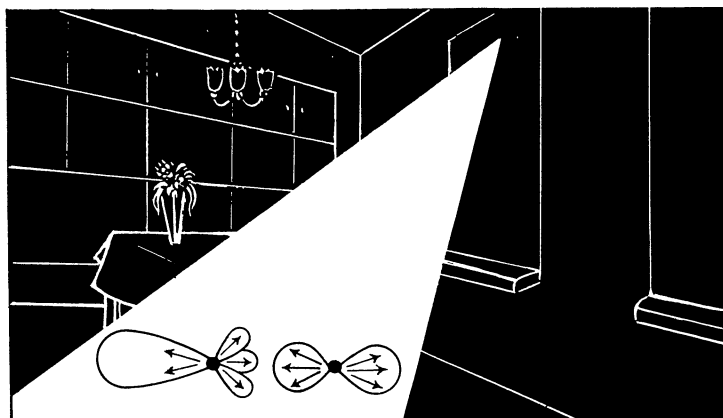
Рассеивать свет при определенных условиях могут высокодисперсные аэрозоли. Некоторые аэрозольные частицы, главным образом металлические и угольные, могут поглощать свет. Крупные частицы, относящиеся к средне- и грубодисперсным системам, кроме поглощения способны отражать и преломлять свет.

Загорать можно и в ненастную погоду, когда небо затянуто облаками. Облака, как и любые другие аэрозоли, способны поглощать свет, но они также и пропускают значительную часть его. Интенсивность света  $I_0$ , входящего в аэрозольное облако, снижается и становится равной  $I$ . Подобное снижение пропорционально толщине облака  $A$ . Ослабление интенсивности света при прохождении его через какую-либо среду, в данном случае за счет поглощения аэрозолями, называют экстинкцией. Если это слой облаков толщиной около 300 м, то солнечное излучение ослабевает примерно в 27 раз, так что в ненастную погоду можно целый день находиться на открытом воздухе, не опасаясь солнечного перегрева.

Вернемся к рассеянию света. Оно было открыто и изучено английским ученым Рэлеем и названо его именем. Рэлеевское рассеяние возможно в тех случаях, когда размеры частиц  $a$  меньше одной десятой длины волны падающего света  $\lambda$ , т. е.  $a < 0,1\lambda$ . Диапазон видимого света лежит в пределах 0,38—0,76 мкм (380—760 нм). В соответствии с этим приведенное условие остается справедливым для аэрозольных частиц, размер которых не превышает 76 нм, т. е. для высокодисперсных систем.

Рассеяние света происходит не всегда, а при соблюдении ряда условий: частицы должны быть незлектропроводны и оптически однородны, иметь изометрическую форму, а счетная концентрация незначительна — во всяком случае расстояние между частицами должно превышать длину волны падающего света.

Причина рассеяния света заключается в следующем: в разреженных неоднородных средах, к которым относятся аэрозоли, световые волны, меняя свое направление под действием частиц, не гасятся. Нарушается прямолинейность распространения света, в чем, собственно, и заключается его рассеяние. Интенсивность рассеянного света неодинакова в разных



Симметричное и несимметричное рассеяние света

направлениях, но симметрична относительно частиц. Механизм рассеяния можно уяснить, если прибегнуть к следующей аналогии. Под действием сторонних колебаний (световых волн) находящийся на поверхности воды поплавочек сам начинает колебаться и испускать волны в разных направлениях (рассеянный свет от световых волн).

Интенсивность рассеянного света  $I_p$  прямо пропорциональна размеру аэрозольных частиц в шестой степени, т. е.  $a^6$ , и обратно пропорциональна четвертой степени длины волны падающего света ( $I_p \sim 1/\lambda^4$ ).

Согласно этому условию, фиолетовый свет (длина волны 380 нм) рассеивается в большей степени, нежели красный, длина волны которого 760 нм. По этой причине бамперы тепловозов и электричек, жилеты железнодорожных рабочих, запрещающие сигналы светофоров окрашивают в красно-оранжевый или красный цвет, который рассеивается меньше, а следовательно, и виден на большем расстоянии.

После прохождения солнечного луча образуется «светлая дорожка» рассеянного света. На это обстоятельство, по-видимому, и обратил внимание М. В. Ломоносов. Глаз человека воспринимает свет, рассеянный частицами, которые сами столь малы, что невидимы не только невооруженным глазом, но подчас даже с помощью оптических средств. Рассеяние света в ограниченном объеме воздуха, например в  $1 \text{ см}^3$ ,



ничтожно, оно становится заметным благодаря огромным пространствам земной атмосферы.

Молекулы газа также рассеивают свет, однако размеры высокодисперсных аэрозольных частиц в сотни и более раз превышают размеры молекул. Это означает, что при одной и той же счетной концентрации рассеяние света аэрозольными частицами интенсивнее молекулярного рассеяния. Соотношение между аэрозольным и молекулярным рассеянием изменяется в зависимости от высоты атмосферы.

В нижних слоях тропосферы концентрация аэрозолей значительная, но и плотность воздуха максимальная. В этих условиях молекулярное и аэрозольное рассеяние примерно одинаково. В более высоких слоях атмосферы концентрация аэрозолей значительно снижается и стабилизируется, а плотность воздуха уменьшается в меньшей степени, чем концентрация аэрозолей. Поэтому в верхней тропосфере и стратосфере, как правило, молекулярное рассеяние превышает аэрозольное. Выше стратосферы и в космосе, когда газ сильно разрежен, рассеяние может происходить в результате взаимодействия света с отдельными молекулами.

Подчеркнем еще раз, что в случае рэлеевского рассеяния длина волны падающего и рассеянного света не изменяется; изменяется лишь интенсивность рассеянного света в зависимости от длины волны.

Когда размеры частиц увеличиваются и приближаются к длине волны света, т. е.  $a \approx \lambda$ , то симметричность рассеяния нарушается, появляются ярко выраженные максимумы интенсивности рассеянного света, а главное, изменяется его длина волны.

Трудно себе представить, что один и тот же предмет без помощи краски может приобретать различный цвет. Для аэрозолей такая возможность существует, и «виною» тому их оптические свойства. Если бесцветную частицу призматической формы осветить узким лучом белого света, то в зависимости от угла наблюдения она будет казаться то красной, то зеленой. Частота чередования цветов и максимум положения цветности зависят от показателя преломления, изменяющегося по направлению светового луча. Это явление используют для определения размеров аэрозольных частиц, в том числе и в Космосе.

Таким образом, аэрозоли обладают целым комплексом оптических свойств, из которых наиболее важным и специфичным является рассеяние света.

### СТО СОРОК СОЛНЦ

Оптические свойства атмосферных аэрозолей нашли отражение в поэзии. Обратимся еще раз к В. В. Маяковскому. В стихотворении «Необыкновенное происшествие...» есть аллегорические строки: «в сто сорок солнц закат пылал», а в поэме «Облако в штанах» — сравнение «и, как небо, меняя тона».

Солнечные лучи при встрече с аэрозольными частицами изменяют направление и интенсивность, обуславливая тем самым атмосферные процессы и явления. Окраска неба, сумерки, ореолы при закате и восходе солнца, радуга и другие световые атмосферные явления — это следствие взаимодействия световых лучей с аэрозольными частицами.

В безоблачный день в атмосфере рассеивается до 20% световой энергии Солнца, падающей на землю. Если бы атмосфера лишилась этой способности, то днем вместо обычного голубого неба над нами простиралась бы черная бездна с яркими звездами. Фиолетовый цвет, длина волны которого примерно в 2 раза меньше, чем у красного, рассеивается в 16 раз интенсивнее. Тем не менее окраска неба все же голубая, а не фиолетовая, хотя фиолетовые лучи находятся в наиболее коротковолновой части спектра. Дело в том, что рассеянный свет, помимо фиолетовых, содержит еще и другие лучи спектра. Эти лучи складываются и дают синюю окраску. Со стороны космоса космонавты видят черное небо и голубой ореол Земли.

Сумерки обусловлены рассеиванием света ассоциатами молекул и аэрозольными частицами верхних слоев атмосферы, расположенных на определенной высоте от земной поверхности. После захода за горизонт солнечные лучи еще продолжают освещать слои атмосферы, которые находятся выше границы земной тени. Рассеянный ими солнечный свет и освещает уже затемненную землю. Верхняя граница освещенного слоя атмосферы изменяется по мере погружения солнца за горизонт. Продолжительность

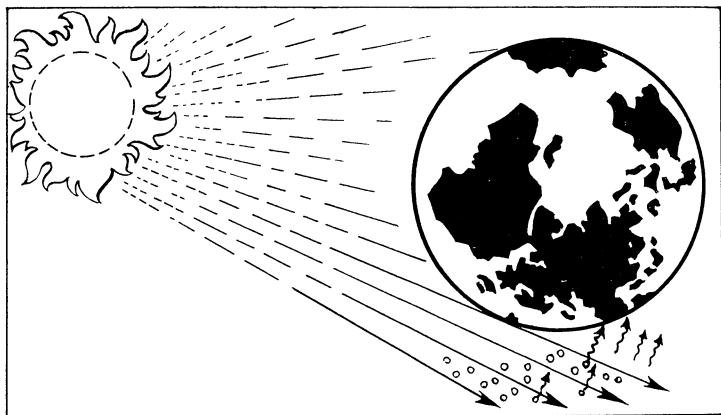


Рисунок поясняет, как происходит рассеяние света в сумерки

сумерек, т. е. перехода от дня к ночи, измеряется временем, в течение которого солнечные лучи будут составлять с горизонтом угол, равный  $18^\circ$ . При большем угле солнечные лучи перестанут достигать верхних слоев атмосферы, и наступает ночь. При восходе солнца те же явления повторяются, но в обратной последовательности. Сначала освещаются верхние слои атмосферы, посылающие на землю рассеянный свет, затем более низкие, и становится светлее; день наступит тогда, когда солнце появится из-за горизонта.

Таким образом, по результатам исследования сумерек и рассвета можно предположительно судить о составе атмосферных аэрозолей. Понадобилось 900 лет, чтобы вскрыть истинную причину сумерек как процесса постепенного перехода от дня к ночи, вызванного рассеянием света атмосферными аэрозолями. Веками ученые выдвигали догадки и предположения, порой гениальные, но так и не смогли объяснить суть этого явления, пока не было открыто рассеяние света аэрозолями и молекулами воздуха.

Из-за того что в арктическом воздухе аэрозольных частиц меньше, значительно ниже и интенсивность рассеяния света, и поэтому небо кажется не светло-голубым, а ярко-синим. При поступлении теплого более загрязненного аэрозолями воздуха оно вновь воспринимается как голубое.

При заходе и восходе солнца его лучи проходят путь в атмосфере примерно в 35 раз больший, чем при положении солнца в зените. На таком расстоянии успевают рассеяться коротковолновые лучи спектра, слабее будет рассеиваться красный свет. Солнце приобретает ярко-красную окраску. Кроме того, возможен своеобразный разлив заката — отсюда и «сто сорок солнц». Частично рассеянный и, значит, ослабленный красный свет солнца позволяет наблюдать невооруженным глазом закат, равно как и восход.

Рассеяние света определяет ряд других оптических атмосферных явлений. Так, образующиеся в лесу высокодисперсные аэрозоли рассеивают свет и вызывают над лесом голубую дымку, которая часто наблюдается в тайге, горах и особенно в эвкалиптовых лесах Австралии и тропиков. Одним из источников аэрозолей оказываются выделяемые лесом различные углеводороды; в атмосфере они могут образовывать аэрозоли органического происхождения.

Поглощение и рассеяние света аэрозолями влияет на городской микроклимат. Зима в городе наступает на одну-две недели позже, а температура в центре города на 1—2 °C выше, чем в пригороде. Такая ситуация объясняется повышенным содержанием аэрозолей в атмосфере городов по сравнению с сельскими местностями. Аэрозоли, с одной стороны, экранируют тепловое излучение поверхности Земли и тем самым повышают температуру воздуха; с другой стороны, они ослабляют солнечную радиацию, что вызывает снижение температуры воздушных масс. Преобладает первый процесс, т. е. экранирование аэрозолями теплового излучения Земли. Он и определяет относительно теплый микроклимат городов.

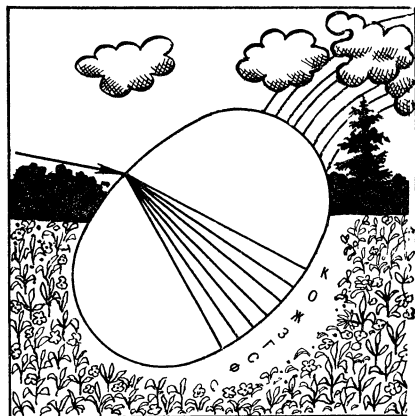
Рассеяние света характерно и для внеземных аэрозолей. Космические аэрозоли также в большей степени рассеивают голубой свет с относительно короткой по сравнению с красным длиной волны. В результате звезда, наблюдаемая через пылевое космическое облако, выглядит покрасневшей, так как в длинноволновой области спектра до Земли доходит относительно большее излучение, чем можно было бы ожидать при отсутствии рассеяния. Тщательное изучение особенностей покраснения звезд можно использовать для определения свойств космических пылинок.

Путем наблюдения из космоса можно определять аэрозольное рассеяние, которое проявляется в изменении яркости звезд на фоне атмосферы Земли. Такие наблюдения были начаты в октябре 1987 года экипажем комплекса «Мир» (космонавты Ю. Романенко и А. Александров) и продолжены в феврале 1988 года на том же комплексе (космонавты В. Титов и М. Манаров). В результате были получены данные о размерах частиц и концентрации космических аэрозолей на высоте около 100 км от поверхности земли. Исследования проводились с помощью электронного фотометра. В этих экспериментах определялось рассеяние звездных лучей. Оказалось, что при заходе звезд за Землю, так же как и при заходе Солнца, наблюдается рассеяние света атмосферными аэрозолями.

Исследование облачного слоя атмосферы Венеры на станциях «Вега-1» и «Вега-2» проводилось спектрофотометрическим методом. Пробы газа вместе с аэрозольными частицами венерианской атмосферы продувались через прибор. Одновременно измерялась интенсивность рассеянного света, что позволяло определить диаметр частиц. Кроме того, определяли показатель преломления в различных направлениях, по величине которого можно сделать заключение о форме частиц. Одновременно проводили анализ состава атмосферы и определяли концентрацию серной кислоты в ней. За время работы прибор трижды проводил анализ атмосферы планеты на высоте 40—65 км.

### **10 ТЫСЯЧ ЛУЧЕЙ ПРОНИЗЫВАЮТ КАПЛЮ**

Вернемся к атмосферным аэрозолям. К числу специфических оптических явлений, вызываемых ими, относится радуга. Луч света, попадая на поверхность капли, преломляется, проходит внутрь капли, при этом отражается от ее внутренней поверхности. При выходе из капли луч света еще раз преломляется и только тогда попадает в глаз наблюдателя. Когда мы смотрим вслед уходящему дождю, то иногда на фоне туч виден светлый полукруг, чаще всего из нескольких цветных полос. Радугу можно наблюдать в солнечный день у городских фонтанов. Возникновение радуги объясняется тем, что капля разлагает



Радуга имеет прямое отношение к аэрозолям

белый свет на составляющие. Для различных цветов спектра показатели преломления отличаются на сотые доли, но этого оказывается достаточным, чтобы лучи света покидали капли под различным углом  $\theta$ . Наибольший угол будет для красного света, он равен  $42^{\circ}02'$ ; для фиолетового света этот угол наименьший ( $42^{\circ}17'$ ).

Радуга кратковременна. Капли дождя, например, диаметром 1 мм оседают со скоростью 30 м/с. Именно такого размера капли образуются во время грозы. Первоначально радуга вспыхивает ярко, но из-за быстрого оседания капель время ее существования может сократиться до нескольких минут. Если на место осевших капель поступят другие, то радуга сохраняется до 10 и даже более минут. В случае мороси, когда диаметр капель может снизиться до 10 мкм, радуга проявляется в виде белесого полукруга, который сохраняется довольно продолжительное время.

Таким образом, вид радуги зависит от размера капель; продолжительность ее существования определяется временем, когда на смену одним каплям приходят другие, при условии, что концентрация аэрозолей остается примерно постоянной.

Каждая капля порождает из белого света семицветный спектр. Почему же мы видим одну многоцветную арку? Еще в 1631 году французский ученый

Рене Декарт, проявив завидную настойчивость, рассчитал ход 10 000 лучей, пронизывающих каплю. Из этого числа только небольшая группа лучей, пронумерованных им от 8500 до 8600, выходила из «капли» под углами, соответствующими, как мы теперь знаем, длинам волн спектра (от  $40^{\circ}17'$  до  $42^{\circ}02'$ ).

Впоследствии, около 170 лет тому назад, на основании оптических свойств световых лучей была выяснена природа этого явления. Капли воды работают как миниатюрные призмы и разлагают свет. В процессе интерференции происходит наложение двух или нескольких световых волн, и в разных точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. Интенсивность луча света, преломленного в капле, характеризуется рядом максимумов, причем значение каждого из максимумов соответствует определенному углу наблюдения. Глаз воспринимает световые лучи только максимальной интенсивности, а более слабые лучи не воспринимаются.

Поэтому видны сомкнутые полосы радуги, которые соответствуют видимым максимумам всех цветов. Они всегда наблюдаются примерно под углом  $42^{\circ}$  в тех случаях, когда наблюдатель стоит спиной к солнцу. Наблюдатель видит радугу только от определенной группы капель. Его глаза служат вершиной конуса с углом  $42^{\circ}$ , а все обозримые капли дождя образуют полукруг в основании конуса.

Помимо радуги встречаются более экзотические оптические явления. К их числу относятся так называемые гало, в частности зимняя радуга в атмосферном инее, несколько солнц, круги вокруг Луны в морозную зимнюю ночь.

Жители Петропавловска-Камчатского 15 мая 1986 года наблюдали необычное зрелище: перед закатом солнца вдруг появилось ярко-красное с различными оттенками свечение, похожее на мощный луч прожектора. Эта оптическая аномалия называется «ложным солнцем». Его причина в том, что лучи заходящего солнца попадают на взвешенные в воздухе ледяные микросталлы, призмы и грани которых ориентированы в определенном направлении.

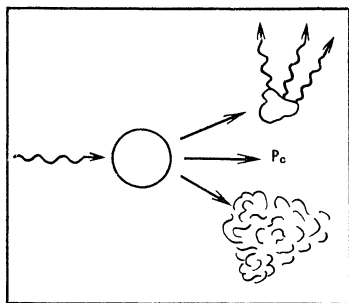
Фантастическое изобретение инженера-авантюриста — персонажа одноименного романа А. Н. Толстого, написанного в 1924—1925 годах, менее чем через полвека получило реальное воплощение в лазерах. Бескровные скальпели, локаторы загрязнений, интенсивификаторы химических превращений — это и многое другое доступно лазерному лучу, одному из значительных открытий современной физики. Кстати, идея концентрирования световой энергии родилась еще в древней Греции. Согласно легенде, Архимед сжег римский флот, сфокусировав солнечные лучи при помощи отполированных до зеркального блеска щитов.

Лазерное излучение в атмосфере оказывает воздействие на аэрозольные частицы. Это воздействие, с одной стороны, аналогично обычному световому. Действительно, потеря энергии лазерного излучения за счет поглощения и рассеяния света может достигать 50% главным образом при воздействии на относительно крупные водяные капли. Доля рэлеевского рассеяния при этом незначительна. С другой стороны, лазерное излучение существенно отличается от световых лучей — прежде всего значительно большей величиной светового давления. Кроме того, появляются новые действующие факторы, такие как интенсивное испарение и горение жидких и твердых аэрозольных частиц. Последствия лазерного излучения и лучей гиперboloида в известном смысле аналогичны — в том и в другом случае лучи сметаюг преграды.

Когда мы греемся на солнце, то ощущаем лишь тепло, но не испытываем давления. Тем не менее даже обычный свет, попадая на предметы, действует на них с некоторой силой. Эта сила, отнесенная к единице поверхности, и будет световым давлением. Измерить крохотную величину светового давления не так-то просто. Это впервые удалось русскому ученому П. Н. Лебедеву в 1899 году. Световое давление значительно меньше гравитационного притяжения Земли, поэтому в земной атмосфере световое давление не оказывает влияния на поведение аэрозольных частиц.

Другое дело — аэрозоли хвостов комет, существую-





Так действует лазерный луч на аэрозольные частицы

щих в более слабом поле тяготения. Солнечные лучи оказывают давление на частицы, из которых формируются хвосты комет, и заставляют двигаться их от Солнца, т. е. в направлении действия светового давления. В этих условиях световое давление определяет положение и направление движения хвостов комет.

Лазерному излучению присущи особые качества: высокая спектральная чистота, пространственная когерентность (сложение колебаний с постоянной разностью фаз) и компактность, что позволяет при мощности источника всего в несколько десятков ватт (мощность средней электрической лампочки) получить в кратковременном импульсе энергию примерно в 10 000 раз большей интенсивности.

Световое давление лазерного излучения  $P_c$  достигает значительной величины и сообщает аэрозольным частицам громадное ускорение. Так, частицы диаметром от 0,1 до 100 мкм в лазерном луче могут получать ускорение, в десятки тысяч раз превышающее ускорение свободного падения. Аэрозольные частицы приобретают способность двигаться и не оседать. Парение частиц во взвешенном состоянии и преодоление силы тяжести, в данном случае за счет светового давления лазерного луча, называют левитацией.

Способность вызывать левитацию аэрозольных частиц — это новое качественное отличие лазерного излучения от обычного светового. Лазерный луч в состоянии разогнать частицы до огромных скоростей. Согласно теоретическим расчетам частицы диаметром 0,5 мкм могут приобрести невероятно боль-

шую скорость — до  $3,10^6$  м/с. Если такую частицу направить в мишень или на себе подобную, движущуюся навстречу с такой же скоростью частицу, то можно получить плазму, температура которой в 50 раз превысит температуру, необходимую для термоядерной реакции с дейтерием. Создание таких температур в пределах возможности современной техники.

Для лучей фантастического гиперболоида состояние дисперсной фазы аэрозолей безразлично — они беспрепятственно «прожигают» и жидкость, и твердые тела. По своим последствиям в этом смысле лазерное излучение действует аналогично.

Лазерный луч вызывает испарение и в конечном счете исчезновение капель негорючей жидкости (в том числе и воды), действует так же, как гиперболоид, т. е. самому себе расчищает путь. Подобный процесс имеет место при воздействии лазерного луча на облака. Если мощность лазерного излучения достаточна, то он может пробить всю толщу облаков, образуя каналы просветления. Естественно, что процесс разрушения облаков начинается с той их части, которая ближе к источнику излучения. При ветре лазерный луч порой не в состоянии пробить всю толщу облаков. С наветренной границы, гонимые ветром, поступают новые порции аэрозоля, которые создают новые препятствия на пути лазерного луча. Лазерный луч можно использовать для борьбы с туманами. Зоны просветления, в частности, могут быть созданы в тумане по всей взлетно-посадочной полосе.

Чтобы при помощи лазерного луча образовались каналы просветления в аэрозолях с твердой дисперсной фазой, необходима такая температура, которая была бы способна обеспечить перегрев, воспламенение и горение твердых аэрозольных частиц. Воспламенение частиц происходит за счет радиационного нагрева, в условиях больших перепадов между температурой частиц и температурой среды. Под действием лазерного излучения горят практически все твердые частицы из любого материала — все зависит от интенсивности этого излучения. Если она не слишком велика, то после воспламенения аэрозольных частиц горение будет сравнительно медленным. С ростом интенсивности излучения скорость сгорания возраста-

ет и может достигать 10 тысяч метров в секунду. По скорости сгорания можно определить время просветления аэрозольного облака. Время сгорания, например, частиц цинка или магния диаметром 1—10 мкм в зависимости от интенсивности лазерного излучения составляет от  $10^{-3}$  до 10 секунд.

Лазерное излучение может не только разрушать аэрозоли, но и генерировать их, способствуя образованию ядер конденсации в случае газов диспергированию в случае твердых тел.

## **ДЖИНН В КОСМОСЕ**

### **ЭКСПЕРИМЕНТ «ЭКСТИНКЦИЯ»**

Космическая пыль! Еще не так давно о ее существовании можно было говорить только предположительно. Теперь мы знаем, что джинн оказался всепроникающим. Его внеземное существование подтверждается космическими экспериментами.

Систематическое и планомерное изучение космоса позволило получить конкретные представления о космических аэрозолях — их составе, свойствах, возникновении и роли во Вселенной. По существу заново создана цельная и большая, в известном смысле самостоятельная, отрасль науки, изучающая космические аэрозоли.

Поначалу сведения о составе и свойствах аэрозолей космического происхождения, полученные в различных исследованиях, значительно отличались друг от друга. Это объяснялось тем, что свойства аэрозолей в космосе фиксировались при помощи косвенных методов, основанных на различных принципах. Часто применяли методы, связанные с определением интенсивности рассеянного света, и по результатам этих исследований делали заключение о свойствах самой пыли. Именно на этой основе проводился эксперимент «Экстинкция» (это понятие уже встречалось ранее).

Начало эксперимента было положено первым международным экипажем на станции «Салют-6» (космонавты А. А. Губарев и Р. Ремек). Цель эксперимента — определение в атмосфере Земли, в

частности на высоте 80—100 км, плотности аэрозольных слоев космического происхождения.

Во время полета научно-исследовательского комплекса «Салют-7» — «Союз-Т-11» — «Союз-Т-12» 23 мая 1984 года по плану геофизических исследований Светлана Савицкая продолжила эксперимент «Экстинкция».

Аппаратура и методы исследования космической пыли постоянно совершенствуются. Если в первых космических полетах использовались отдельные приборы и комплекты приборов, то в дальнейшем в космос отправлялись целые лаборатории. Такую космическую обсерваторию представлял собой астрономический спутник США «Коперник», при помощи которого в течение более десяти лет (1970—1980 гг.) проводились систематические и многочисленные астрономические наблюдения за космосом, в том числе за космической пылью. Кстати, подобные наблюдения проводились при помощи оптических методов, основанных на рассеянии света различной длины волны.

На основании многочисленных исследований и в зависимости от условий образования местонахождения и свойств космические аэрозоли можно разделить на несколько групп, а именно: попадающие в атмосферу Земли, образующиеся в результате космических полетов, межзвездные аэрозоли (собственно, аэрозоли Вселенной), аэрозоли планет и комет. Иначе говоря, космический джинн не однороден.

Космические аэрозоли отличаются от своих земных собратьев не только происхождением и составом. Глубокий вакуум и даже безгазовое пространство; большой перепад температур — от ледяного холода до тысячеградусной жары; огромные скорости движения частиц — все это не может не сказаться на аэрозольных системах и действительно определяет их особенности.

Начнем рассмотрение этих особенностей с тех аэрозолей космического происхождения, которые соседствуют с Землей.

За сутки на Землю обрушиваются 45 тонн метеоритов. Если бы вся эта масса достигала земной поверхности, то Земля покрылась бы слоем метеоритной пыли. Фактически же на Землю попадает малое число космических тел, которые практически не влияют на формирование земной поверхности. Невольно возникает вопрос: куда же исчезает огромная масса метеоритов?

45 тонн в сутки или около 20 тысяч тонн в год — это лишь усредненные цифры, полученные в результате многолетних наблюдений. Фактически масса метеоритов, ежесуточно устремляющихся к Земле, колеблется от 14 до 170 тонн. Встречаются аномалии в виде метеоритных дождей, когда за 10—15 мин метеоритный поток увеличивается в массе в среднем на 2—3 порядка.

Из общего количества метеоритов бо́льшая часть (до 40 тонн) приходится на относительно крупные частицы массой от  $10^{-11}$  до  $10^{-4}$  граммов, а остальные 5 тонн — на мельчайшие пылинки (масса которых колеблется в пределах от  $10^{-17}$  до  $10^{-11}$  граммов, а размер — от 0,01 до 1 мкм). Большинство мелких частиц испаряется и исчезает, а крупные метеоритные частицы дробятся на более мелкие. Часть мелких частиц может поглощать влагу и укрупняться.

Наиболее крупные метеориты хотя и уменьшаются в массе при полете через атмосферу, но все же достигают поверхности Земли. Самые массивные из них оставляют автографы в виде кратеров. Примечательно, что метеоритные кратеры обнаружены не только на поверхности суши, но и на морском дне. Такой кратер, например, был найден недалеко от побережья Новой Шотландии (Канада). По-видимому, метеорит либо пробил толщу воды, сохранив при этом значительную скорость, необходимую для образования кратера, либо упал на сушу, залитую затем водой в результате трансгрессии океана. Такие бо́льшие метеориты, разумеется, уже нельзя относить к аэрозольным системам, но в полете они могут дробиться на осколки частиц аэрозольных размеров.

В околоземном пространстве аэрозоли космическо-

го прохождения концентрируются неравномерно. Царство аэрозолей, пришельцев из Космоса, простирается на высоте свыше 140 км. Это своеобразные автографы, характеризующие свойства космических тел. На этой высоте находятся космические пылинки, которые обладают космической скоростью, не отягощены гравитацией и летят, практически не встречая сопротивления.

Ниже 140 км в атмосфере Земли космические аэрозоли составляют незначительную долю от всех аэрозолей и распространяются совместно со своими земными коллегами. При этом соотношение аэрозолей различного происхождения зависит от высоты по отношению к поверхности земли. В среднем можно считать, что одна космическая пылинка приходится на 10 миллионов земных частиц.

Верхний слой атмосферы, на высоте 80—140 км, является своеобразным тормозом, «гасящим» скорость космических частиц. В этом слое происходит выравнивание концентрации этих частиц по сравнению с вышележащим слоем. Относительно крупные частицы массой более  $10^{-8}$  г (диаметром свыше 10 мкм) дробятся, нагреваются и частично испаряются.

В мезосфере, на высоте 60—80 км, где наблюдается минимум атмосферной температуры, обнаружен аэрозольный слой, который состоит из частиц различного происхождения. Очень незначительная доля этих частиц попадает с поверхности Земли. Большая часть аэрозольных частиц может образовываться в атмосфере из газовой среды и представляет собой многоядерные комплексные соединения (кластеры), размеры которых менее 1 мкм. (О кластерах речь шла выше.) Кроме того, космос посылает в этот слой пылинки метеоритного происхождения диаметром до 10 мкм. Подобные пылинки образуются в результате дробления более крупных частиц и изотермической перегонки, т. е. исчезновения мелких частиц и роста за счет этого более крупных. Кластеры и пылинки могут быть в свою очередь ядрами конденсации для серебристых облаков.

На высоте свыше 60 км может образовываться второй аэрозольный слой Юнга. Этот слой по сравнению с первым слоем Юнга (см. рисунок на с. 65) более мощный; в нем одновременно содержатся аэрозоли

земного и космического происхождения. Однако второй слой Юнга в отличие от первого слоя образуется не во всех случаях.

В относительно плотные слои воздуха на высоту ниже 50 км и до 25 км проникают отдельные мельчайшие космические частички. Скорость оседания этих частичек незначительная. Поэтому концентрация их примерно постоянна, а под действием воздушных потоков они могут перемещаться глобально над всей поверхностью Земли.

Таким образом, космические аэрозоли в околоземном пространстве находятся в постоянном обновлении: они исчезают, испаряются и укрупняются.

### **ОДИН ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРОГРАММЫ «СОЮЗ — АПОЛЛОН»**

Со времени первого полета Юрия Гагарина накоплен огромный опыт и получены такие сведения о последствиях космических полетов, которые первоначально трудно было предвидеть. К числу таких неожиданностей относится образование аэрозолей, вызванное полетом космического корабля.

Возникновение аэрозолей, сопутствующих космическим полетам, — своеобразного газопылевого окружения кораблей — связано с различными процессами: испарением летучих материалов с внешней поверхности корпуса корабля, утечкой газа из гермоотсеков, работой реактивных двигателей и систем жизнеобеспечения, срабатыванием пиропатронов, механическими воздействиями (в частности метеоритов) и некоторыми другими. Значительная часть веществ переходит в космическую среду в виде газов, которые быстро охлаждаются и в результате десублимации образуют твердые аэрозольные частицы.

Возникшие аэрозоли рассеивают солнечные лучи, создают световой фон; при этом изменяется интенсивность светового потока, что влияет на показания оптических приборов. Кроме того, часть аэрозольных частиц оседает на внешней поверхности приборов, изменяя характеристики этих приборов, и затрудняет визуальные и оптические наблюдения.

При полете космического корабля «Восток-2» в августе 1962 года Г. С. Титов впервые обнаружил по следу корабля светящиеся частицы. Впоследствии их описал и американский астронавт Гленн во время

полета на космическом корабле «Меркурий». Аэрозольные частицы, которые создавали светящийся ореол и интенсивно рассеивали свет, космонавты приняли поначалу за неизвестные звезды. В дальнейшем удалось выяснить, что это за объекты. Светящиеся частицы находились на расстоянии всего нескольких метров от корабля. По цвету, размерам, характеру движения и мерцания их легко можно отличить от звезд. Ночью, в отсутствие солнечных лучей, частицы не обнаруживались; оказалось, что светящиеся объекты — это не что иное, как аэрозоли, возникающие при полете космических кораблей.

Основным поставщиком аэрозолей, которые впоследствии сопровождают космический корабль и образуют светящиеся частицы, является последняя ступень ракеты-носителя. Еще космонавты Г. С. Шонин и В. А. Шаталов наблюдали множество частиц, которые появлялись после отделения космического корабля от ракеты-носителя. Согласно оценке большинства космонавтов и астронавтов, уже после 15 витков полета видны лишь отдельные светящиеся частицы, тогда как сразу после отделения корабля от ракеты-носителя, т. е. в начале орбитального полета, в иллюминатор видны тысячи таких частиц.

Число светящихся частиц увеличивается при работе двигателей космических кораблей (в процессе их ориентации, стыковки и других маневрах). После конденсации газовых компонентов топлива и продуктов сгорания образуются аэрозольные светящиеся частицы, которые создают шлейф от космического корабля в направлении оси работающих двигателей. Шлейф с течением времени вытягивается по орбите, образуя постепенно рассеивающийся пылевой след.

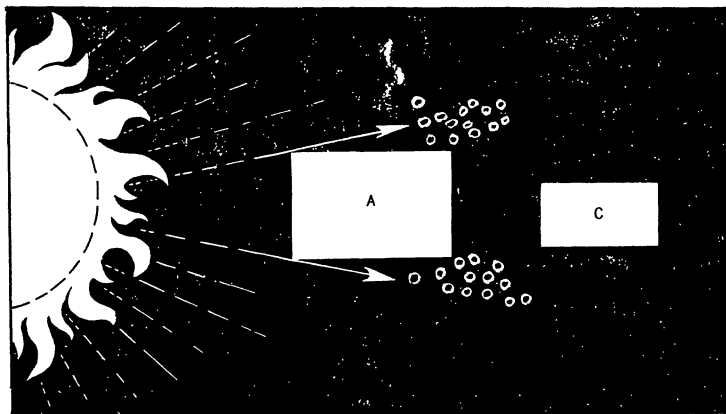
Частицы пылевого окружения космического корабля имеют в основном размеры в несколько десятых долей миллиметра, т. е. в сотни микрометров, и относятся к сравнительно большим. Длина пылевого шлейфа определяется плотностью атмосферы, которая изменяется в зависимости от высоты. Космические корабли летают на различных высотах и, следовательно, оставляют неодинаковый по длине след. Орбита станции «Салют» простиралась на высоте 200—250 км, а станции «Союз» — уже на высоте около 300 км, длина шлейфа во втором случае была больше.



Возникновению аэрозолей в космосе способствует вакуум: в этих условиях происходит испарение и десублимация материалов и покрытий. Первоначально при изготовлении внешних узлов космических кораблей эти процессы учитывались не в полной мере. Впоследствии стойкость материалов в вакууме стала одним из важнейших критериев, определяющих пригодность для космоса тех или иных материалов и покрытий.

На высоте 200 км давление составляет всего 0,13 Па, т. е. примерно в 700 тысяч раз меньше земного атмосферного. В этих условиях испаряются смазки и масла, некоторые оксидные пленки, адсорбционные слои газов и водяного пара. Часть испарившихся веществ может превратиться в аэрозоли. При полете космического корабля «Джемини» жидкие отходы, выброшенные за борт, образовали аэрозольный шлейф за кормой. Мелкие частицы, диаметром около 1 мкм, оставались вблизи корабля всего одну секунду, а затем испарились. Аэрозольные же частицы выбросов диаметром 100 мкм существовали уже около 100 секунд. Жидкие отходы в условиях космического полета и низкой температуры космического пространства могут превращаться в кристаллы льда, создающие световые помехи для оптических приборов. Подобные помехи наблюдали астронавты космических кораблей «Аполлон-12» и «Аполлон-15».

В рамках советско-американской программы «Союз — Аполлон» был проведен совместный оптический эксперимент — исследование газопылевого окружения пилотируемого космического корабля «Аполлон». Эксперимент проводился с корабля «Союз-19» со стороны сумеречной зоны по отношению к восходу Солнца. Перед началом эксперимента корабли в состыкованном состоянии ориентировались продольной осью на Солнце. Затем они разошлись на расстояние 220 м, сохраняя направление осей. При этом тень от корабля «Аполлон» (А) приходилась на тот иллюминатор корабля «Союз-19» (С), через который проводились визуальные наблюдения и фотографирование. На снимках была получена солнечная корона на фоне рассеянного газопылевого облака космического корабля, что позволило характеризовать размер и структуру этого облака.



Газопылевое облако вокруг корабля «Аполлон», наблюдаемое в иллюминатор корабля «Союз-19»

Таким образом, космические аэрозоли возникают и как следствие космического полета, сопровождая космические корабли в виде шлейфа из частиц, светящихся с различной интенсивностью.

### **КОСМОС — ЗЕМЛЯ, ЗЕМЛЯ — КОСМОС**

Из всех источников образования аэрозолей, вызванных запуском в космос земных объектов, наиболее мощным является выхлоп продуктов сгорания двигателями различных ступеней ракет-носителей.

Современные мощные ракеты-носители для вывода на орбиту кораблей массой в несколько десятков тонн расходуют топлива в 20—30 раз больше массы полезного груза. Так, стартовая масса американской ракеты «Сатурн-5» составляла 2900 тонн, а полезный груз около 100 тонн. 15 мая 1987 года был сделан новый шаг в освоении космоса. В этот день на космодроме Байконур проводились первые летные испытания новой универсальной ракеты-носителя «Энергия». Ее масса свыше 2000 тонн, в основном за счет топлива, которое обеспечивает вывод на орбиту более 100 тонн полезного груза.

Таким образом, уже в начале полета космического корабля сразу после старта и до выхода на орбиту (всего за 100—120 секунд) генерируется огромное

количество аэрозолей, исчисляемое сотнями и тысячами тонн.

Расчеты показывают, что при запуске 1000 мощных ракет с полезным грузом 300 тонн каждая будет выброшено 6—9 миллионов тонн продуктов сгорания ракетного топлива. Это меньше, чем промышленные выбросы, но тем не менее уже сейчас речь идет о загрязнении космоса со стороны Земли. При оценке этого загрязнения следует учитывать также, что на орбитах уже в настоящее время насчитывается свыше шести тысяч различных объектов — посланцев Земли (активных и отработавших спутников, космических кораблей, обтекателей, последних ступеней ракет и др. ).

7 февраля 1991 года прекратил свое существование орбитальный комплекс «Салют-7» — «Космос-1686». В плотных слоях атмосферы Земли он превратился в бесформенную массу горящих осколков. Затем произошло диспергирование несгоревших остатков конструкций комплекса, конденсация и десублимация паров, образовавшихся после сгорания основной массы осколков. В результате возникли доставленные из космоса аэрозоли земного происхождения. Не вся масса комплекса осталась в атмосфере: из 40 тонн полторы тонны обломков достигли земной поверхности. К счастью, своеобразный град обломков обрушился на ненаселенные горные районы Аргентины.

Аэрозоли земного происхождения, сопровождающие полет космических кораблей, способны загрязнять внешнюю поверхность корабля, в том числе и оптические приборы. Согласно данным астронавтов космического корабля «Аполлон-7», источниками загрязнений являются топливо стартовых двигателей и частицы, которые возникают после сублимации силиконовой резины уплотнителей иллюминаторов.

Размеры частиц аэрозолей, осевших на иллюминаторы из трехслойных кварцевых стекол спускаемого аппарата космического корабля «Союз-18», составляют от 5 до 70 мкм. Этот корабль в течение 63 суток находился в космическом полете в составе орбитальной станции «Салют-4». Общая поверхность, покрытая слоем аэрозольных частиц, составляла всего 0,62% от поверхности иллюминатора. Тем не менее прилипшие аэрозольные частицы, вызывая рассеяние света, за-

трудняли визуальные наблюдения и оптические исследования.

Загрязнение внешней поверхности аэрозольными частицами может быть вызвано предстартовыми факторами. Старт корабля «Аполлон-12», например, проходил во время грозы. В начале полета астронавты обнаружили на внешних стеклах иллюминаторов высохшие грязевые потеки, которые возникли за счет дождевых осадков, попавших на стекла во время старта.

Развитие космонавтики позволяет все отчетливее реализовать практические преимущества обратного взгляда из космоса на Землю. Подобный взгляд может иметь и «аэрозольную направленность». Уже никого не удивляет сопровождение телевизионных прогнозов погоды снимками облаков, которые сделаны спутниками и характеризуют их размеры, образование, перемещение и исчезновение. Один космический цветной снимок позволяет зафиксировать территорию Земли, равную по площади Московской области, и увидеть то, что ранее было недоступно. Четверть века тому назад, когда еще не было метеорологических космических исследований, более половины тропических циклонов оставалось незамеченными, так как они возникали главным образом над открытым океаном и были недоступны для метеорологических станций. (Слово «циклон» греческого происхождения; оно означает «крутящийся».) Скорость воздуха в гигантской аэрозольной воронке достигает скорости спортивного самолета. Во взвешенное состояние переходят не только частицы, образующие аэрозоли, но и все, что попадает на пути циклона. Из космоса можно увидеть, определить зарождение и распространение тропических циклонов и своевременно предпринять необходимые предупредительные меры.

Дистанционное зондирование и съемки из космоса позволяют определить распространение аэрозолей атмосферы Земли от промышленных выбросов, лесных пожаров, извержения вулканов и других источников.

Аэрозольные последствия войны в Персидском заливе в начале 1991 года, вызванные налетами армады самолетов и обстрелами ракет, а также

нефтяными пожарами, зафиксированы спутниками и живыми свидетелями — космонавтами Виктором Афанасьевым и Мусой Манаровым, совершавшими космический полет на орбитальном комплексе «Мир».

Таким образом, космическая техника, с одной стороны, открывает новые возможности для изучения земных аэрозолей, а с другой, она сама является источником образования аэрозолей, загрязняющих космическую среду.

### **АЭРОЗОЛИ ВСЕЛЕННОЙ**

Вселенная — это почти пустое пространство, в котором звезды занимают лишь ничтожную часть. «Почти» не означает «совсем». Если стаканом объемом около  $200 \text{ см}^3$  «зачерпнуть» вещества из межзвездного пространства, то в нем окажется в среднем 20 атомов водорода и 2 атома гелия. Атомы других элементов распределяются в большем объеме.

В безграничном межзвездном разреженном газовом пространстве зарождаются и существуют твердые частицы, которые образуют космическую пыль. В среднем принято считать, что на долю космической пыли и других образований, из которых формируются аэрозоли Вселенной, приходится около 1% массы межзвездной среды.

Установлено, например, что общее количество газообразного водорода в межзвездном пространстве в луче сечением  $1 \text{ см}^2$ , пронизывающем это пространство, достигает  $26 \cdot 10^{20}$  атомов. Молекулярный водород komponуется в облаках, занимающих около 2% объема галактики. Еще не ясен состав этих облаков. Можно предположить, что водород в гигантских молекулярных облаках в состоянии конденсироваться с образованием сгустков, которые можно рассматривать как своеобразные аэрозоли. Впоследствии эти сгустки могут уплотняться в диски и сгущаться до звезд.

С помощью астрономического спутника обсерватории США «Коперник» на основе оптических наблюдений по рассеянию света различной длины волны удалось получить соотношение между количеством атомов водорода и образований из них. Газообразного водорода оказалось в три раза больше водорода,

входящего в состав образований, из которых формируются водородные облака.

Источником космических аэрозолей является межзвездный газ. Помимо водорода в результате звездных термоядерных реакций в межзвездном пространстве рассеяны девять наиболее распространенных элементов: He, C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe. Каждый из этих элементов может входить в состав космической пыли. Кроме того, в межзвездном пространстве могут образовываться аэрозольные частицы из диэлектриков (например, силикатов), электропроводящего материала (в частности, из уже упоминавшихся железа и графита), аммиака, метана и других газов, а также замерзшей воды. В этом случае процесс образования космических аэрозолей аналогичен появлению кристаллов в облаках атмосферы Земли, когда с нагретым воздухом в верхние слои атмосферы поступают пары воды.

По степени нагрева межпланетные аэрозоли можно условно отнести к трем группам: холодные пылинки имеют температуру 15—25 К, их около 37%; теплые частицы, число которых достигает 50%, нагреты до температуры 30—40 К; горячие частицы имеют температуру 250—500 К, но их относительно немного — всего 13%.

Атмосфера звезд, как и межзвездное пространство, определяет состав аэрозольных частиц, входящих в эту атмосферу. Так, если в атмосфере обнаружен углерод, то в аэрозольных частицах может находиться графит и аморфный углерод. Кислород атмосферы обуславливает наличие в аэрозольных частицах кислородсодержащих соединений.

Мы еще далеки от полного понимания того, как происходит формирование космической пыли, но уже сейчас есть достаточно оснований, чтобы описать по имеющимся сведениям качественную, а в некоторых случаях и количественную картину ее зарождения. Будущее покажет правомерность нынешних воззрений.

Одна из гипотез образования звездной пыли основана на различии температуры космических аэрозолей. Тугоплавкие зародыши пылевидных частиц, образующиеся в атмосфере относительно холодных звезд, поступают с газом из более нагретого простран-

ства в холодную среду и за счет десублимации переходят в твердую фазу. Таким путем получают частицы, содержащие некоторые силикатные соединения и металлы, в частности железо.

Космические масштабы аэрозольного джинна несоизмеримы с земными. Атмосферные аэрозоли даже при круговом движении вокруг Земли покрывают расстояние немногим более 40 тысяч километров. Аэрозоли космического происхождения распространяются в пространстве, исчисляемом тысячами световых лет. (Напомним, что один световой год равен расстоянию, который проходит свет в течение года, т. е.  $9,46 \cdot 10^{12}$  км.)

Не следует путать межзвездную космическую пыль с метеоритами. Метеориты — это осколки планетного материала, и их состав отличается от состава межзвездной пыли. Большинство метеоритов каменные, из скальных пород. Каменные метеориты называют хондритами, поскольку они содержат округленные включения — хондры. Эти включения отличаются по составу от других частей метеоритов и содержат до 5% различных соединений углерода. Некоторая (меньшая) часть метеоритов содержит железо — каменные включения, богатые металлами. Отдельные метеориты могут состоять из железа, никеля и других металлов. Как отмечалось, они бывают различного размера: от мельчайших пылинок до огромных глыб.

### **АСТРОЗОЛИ**

Космическая пыль и мелкие частицы метеоритов отличаются от земных аэрозолей не только составом и происхождением. Главное отличие в другом. В безгазовом разреженном космическом пространстве возникает новый тип аэрозолей — только из одной дисперсной фазы при практическом отсутствии дисперсионной среды. Напомним, что условно этот тип аэрозолей обозначается Т/ (см. таблицу на стр. 15).

Как уже отмечалось, космические аэрозоли в безгазовом пространстве предложено называть астрозолями. Подобное название еще не является общепринятым, но тем не менее наряду с другими названиями аэрозольных систем (например, туман, смог и т. д.) оно подчеркивает специфику этого вида аэрозолей.

По сравнению с аэрозолями, у которых дисперсионной средой служит газ, у астрозолей ряд свойств не проявляется, другие видоизменены; в то же время возникают сугубо специфические свойства. В слишком разреженной газовой атмосфере, и тем более при ее отсутствии, нет броуновского движения, т. е. самопроизвольного движения частиц под действием кинетической энергии молекул дисперсионной среды. Нет броуновского движения — нет и броуновской коагуляции (т. е. коагуляции за счет столкновений между частицами, которая привела бы к их слипанию, увеличению размеров и оседанию, о чем уже шла речь выше). Кроме того, невозможна и диффузия, т. е. самопроизвольный процесс перехода аэрозольных частиц из области большей концентрации в область меньшей концентрации. Невозможен также и термфорез, который вызван неодинаковой кинетической энергией холодных и более нагретых газовых молекул. Отсутствует давление газа и исключается сопротивление газовой среды движению частиц.

В глубоком вакууме резко интенсифицированы процессы испарения, а астрозоли в виде капель жидкости существовать не могут. Вакуум значительно ускоряет сублимацию, т. е. переход твердых частиц в газообразное состояние. Поэтому в межпланетной среде могут существовать только те аэрозольные частицы, которые устойчивы к сублимации.

В отсутствие газовой атмосферы поверхность частиц оголена, т. е. на ней нет слоя адсорбированных молекул газа, какой всегда имеется на аэрозольных частицах, окруженных газовой дисперсионной средой (равно как и на любой другой поверхности). Оголенная поверхность обладает большой активностью. Не случайно в этих условиях адгезия (прилипание) аэрозольных частиц к различным поверхностям (скафандров, отдельных частей космических аппаратов и др.) необычайно велика. Американские астронавты обнаружили, что запыленная в космическом пространстве поверхность скафандров в кабине космического корабля не очищается при помощи обычных пылесосов.

Рэлеевское рассеяние света, характерное для аэрозолей, присуще также и астрозолям. В то же время в вакууме наблюдается так называемый оптический



пробой, т. е. самопроизвольный переход квантов света от одной частицы к другой. В отсутствие газовой среды и, следовательно, контактного отбора тепла в прямых лучах солнца и звезд космические частицы могут интенсивно нагреваться.

В отличие от земных аэрозолей астрозоли испытывают воздействие солнечного ветра, т. е. движущегося горячего ионизированного газа (плазмы) от Солнца. Масса этого газа, извергаемого солнечной короной, исчисляется миллионами тонн в секунду, а скорость достигает 400 км/с. Солнечный ветер — это распространенный в космическом пространстве стремительный, но все же разреженный поток ионов. Он увлекает частицы астрозолей. Если бы солнечный ветер гнал астрозоли к поверхности Земли с изначальной скоростью, то они смогли бы пройти расстояние от Солнца до Земли в течение пяти суток. Этого не происходит, поскольку плотность солнечного ветра невелика и быстро снижается по мере удаления от Солнца. Солнечный ветер теряет свою силу, и на движении астрозолей все более начинает сказываться влияние светового давления.

Световое давление способствует ориентации и движению хвостов комет, о чем уже упоминалось, а также положению и направлению движения микрометеоритов и аэрозолей туманностей. Космические пылинки испытывают световое давление не только со стороны Солнца, но и звезд. Величина звездного светового давления неодинакова; она зависит от природы звезд, расстояния до них, размеров космических частичек. Неодинаковое световое давление, которое испытывают космические пылинки различных размеров, может служить причиной столкновений, роста и дробления частиц. Частицы получают под действием светового давления различные ускорения, что способствует распределению частиц по размерам в пылевом облаке.

Величину светового давления сопоставляют с силой гравитационного притяжения звездами астрозольных частиц. Расчеты показывают, что для частиц размером от 0,001 до 1,0 мкм световое давление может в тысячу раз превышать гравитационную силу. Значительное световое давление сообщает частицам скорость до 2—8 км/с. Эта скорость все же относительно

ниже той, которую могут приобрести частицы под действием солнечного ветра (400 км/с).

Таким образом, в межзвездном пространстве аэрозольные частицы (а также хвосты комет) могут двигаться за счет солнечного ветра, светового давления и гравитации. Некоторые космические частицы обладают магнитными свойствами, что позволяет им ориентироваться и двигаться также и за счет магнитного поля.

Огромные скорости, которыми обладают частицы астрозолей, обуславливают и характер взаимодействия этих частиц. Если в космосе сталкиваются две пылинки со скоростью меньше 1 км/с, то они слипаются. При больших скоростях столкновение может быть преимущественно упругим, т. е. пылинки отскакивают друг от друга. При скорости 20 км/с частицы, столкнувшись, разрушаются.

Небесные аэрозоли, как и земные, живут своей жизнью — они возникают, изменяются, перемещаются и исчезают.

#### **СВЕДЕНИЯ ДАВНОСТЬЮ БОЛЕЕ ЧЕТЫРЕХ МИЛЛИАРДОВ ЛЕТ**

Напомним, что звездную систему, в которую входят Солнце и Земля, называют Галактикой (пишется с прописной буквы). Она имеет вид диска, состоящего из сотен миллиардов звезд, туманностей и межзвездного вещества, включающего космическую пыль. Размеры диска огромны: толщина порядка 10 000 световых лет (за это время луч света пройдет всю Галактику), а диаметр — в десять раз больше его толщины.

За пределами нашей Галактики находятся другие галактики (пишутся со строчной буквы), состоящие из скопления звезд и имеющие размеры, соизмеримые с нашей. Молекулярно-пылевые облака играют важную роль в динамике и эволюции галактик. Свидетельством этого является Млечный путь — видимая нами область космоса, где наблюдается скопление звезд Галактики. Облака из пыли и газа составляют до 5% Млечного пути.

Своеобразную аэрозольную систему представляют хвосты комет. Здесь точнее говорить об аэрозолях, а не об астрозолях, так как при нагревании под

действием солнечного излучения тело кометы способно выделять большое количество пыли и газа (слово «комета» в переводе с греческого означает «длинно-волосый»). Действительно, огненная звезда комет напоминает распущенные пышные волосы. Видимые нами гигантские «косы» есть не что иное, как освещенные Солнцем аэрозольные шлейфы кометы.

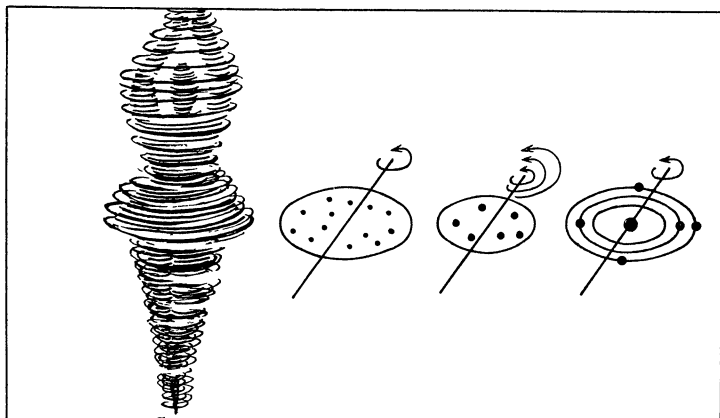
Масса комет очень мала по сравнению с массами планет Солнечной системы — всего  $10^{-12}$ — $10^{-6}$  массы Земли. Следовательно, их собственная гравитация также незначительна. Это, в свою очередь, свидетельствует о постоянстве состава комет, т. е. он в настоящее время остался таким же, каким был в первичной газопылевой туманности. Подобное обстоятельство очень важно: оно позволяет уяснить, как образовалась Солнечная система и как возникла жизнь на Земле. Исследуя вещество комет, можно получить сведения о первичном материале, из которого 4,6 миллиарда лет назад сформировались планеты и их спутники, т. е. за много лет до возникновения легенд о джинне.

Кометы можно уподобить своеобразному кому грязного снега, состоящего из клатратов — соединений включения, о которых речь шла раньше. Когда комета приближается к Солнцу, снег в верхней ее части испаряется, а газ и пыль освобождаются от снежного плена, рассеиваются и образуют оболочку, называемую комой. Из газа и пыли образуются также хвосты, которые тянутся за ядрами комет на многие миллионы километров.

## **ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗЕМЛИ И ЖИЗНИ НА НЕЙ**

Космическая пыль, существование которой уже не вызывает сомнений, могла сыграть определенную роль в возникновении Земли и в зарождении жизни на ней.

Согласно одной из существующих гипотез, все тела Солнечной системы, и кометы в том числе, возникли в едином процессе эволюции досолнечного газопылевого облака. Огромное газопылевое облако размером в десять световых лет начало сжиматься под влиянием собственной гравитации. Энергия сжатия превращалась в излучение, т. е. при сжатии облако стало нагреваться. Сжатие медленно движущегося облака



При круговом движении газопылевого облака возникает ускорение, подобное ускорению при пируэте фигуристки

привело, по закону сохранения момента количества движения, к увеличению скорости вращения и, следовательно, к возрастанию центробежных сил, уплотняющих облако вдоль оси вращения. По мере уплотнения газопылевое облако уменьшалось в размерах и вращение его происходило с ускорением. Подобное явление мы наблюдаем, когда фигуристка делает пируэт: не прикладывая дополнительных усилий, а только прижав руки к туловищу или резко вскинув их вверх, она значительно ускоряет вращение.

В результате совместного действия центробежных сил и сил тяготения частицы огромного аэрозольного облака концентрировались в экваториальной плоскости. Крупные частицы захватывают мелкие и увеличиваются в размерах. Пылевой слой становится плоским и вокруг центра возникают кольцевые зоны, а частицы спекаются, образуя единую массу. Совместное действие сжатия и вращения приводит к повышению плотности в центре облака, где возникает так называемое протосолнце. Когда плотность протосолнца становится достаточной для того, чтобы в нем начались термоядерные реакции, оно превращается в Солнце. Под воздействием солнечных лучей, а также дальнейшего сгущения и спекания из газопылевого облака формируются планеты и кометы, составляющие Солнечную систему.

Если продолжать принятую аналогию — соизмерять судьбу аэрозолей с джином, то образование Солнечной системы можно представить следующим образом: в длительном эволюционном процессе космический джинн загоняется в гигантские емкости: бочки, которые можно представить как звезды, бутылки (планеты) и пузырьки, которые можно уподобить кометам.

Таким образом, весьма вероятно, что аэрозоли были единственными источниками, из которых формировалась Солнечная система с планетой Земля.

Этим роль аэрозолей в формировании Вселенной не ограничивается. Существует несколько предположений о возникновении жизни на Земле, т. е. о превращении неживой органической материи в живые тела. Одна из гипотез связана с живой галактикой и проникновением на Землю, вместе с космической пылью, заготовок, необходимых для зарождения жизни.

Есть ли жизнь на Марсе и возможна ли вообще жизнь вне Земли? Этот вопрос занимал одного из персонажей фильма «Карнавальная ночь» (фильм вышел на экран в 1956 году), и до сих пор он интересует человечество. Надежд на жизнь вне Земли очень мало, но там обнаружены вещества, из которых возникает живая материя. Так, в атмосфере некоторых планет (Юпитера и Сатурна и их спутников) найдены органические соединения вплоть до белков и нуклеиновых кислот.

Исследования академика Н. С. Ениколопова с сотрудниками, удостоенные в 1980 году Ленинской премии, показали, что при высоких давлениях в твердых телах при сдвиговых деформациях начинается аномально быстрая полимеризация \* молекул. Подобная ситуация возникает при попадании (внедрении) метеоритов в наружный слой ледяной коры спутников Юпитера. Полимеризация, инициируемая ударом, приводит к образованию сложных органических соединений, которые способны стать строительным материалом для простейших живых организмов.

---

\* Полимеризация — способ синтеза полимеров путем последовательного присоединения молекул мономера (низкомолекулярного вещества) к активному центру, находящемуся в конце растущей цепи, из которой формируется макромолекула полимера.

С каждым годом появляются все новые сведения в пользу того, что многие органические соединения, послужившие основой возникновения жизни на Земле, могут синтезироваться в космосе. Спектральными методами выявлены десятки таких веществ в далеких туманностях; сложнейшие органические молекулы типа порфиринов обнаружены в хондритных участках метеоритов. Моделируя атмосферу Юпитера, в земных условиях удалось синтезировать коричневый полимерный материал, который в основном (на 84%) состоит из элементной серы, остальную часть составляют ее органические производные. Спектр этого материала оказался похожим на спектр коричневых облаков Юпитера.

На частицах метеоритной пыли в космосе адсорбируются простые молекулы. Большая поверхность космических частичек, размер которых составляет порой доли микрометра, выступает в качестве катализатора и способствует образованию белковоподобных соединений. Микроскопические космические частицы выполняют роль своеобразного поставщика на Землю веществ, необходимых для зарождения жизни. Сказанное можно подтвердить фактами. Так, в метеорите Мергисон, который в 1976 году упал в Австралии, найдено 16 аминокислот — соединений, которые входят в состав белков и других физиологически активных соединений, а также клеточных структур. Пять из этих аминокислот обнаружены в живых земных организмах.

Конечно, доставка из космоса на Землю материала для живой материи посредством только «аэрозольного транспорта» — лишь один из возможных путей возникновения жизни на Земле. Дальнейшие исследования покажут, насколько эта возможность реальна и является ли она единственной. Прямое влияние, которое космические аэрозоли могут оказывать на земную жизнь, представляется более вероятным.

Тридцать четыре миллиона лет тому назад на Земле резко изменился климат, он стал более суровым. Были высказаны различные предположения о причинах, в том числе и связанные с аэрозолями. В ту эпоху на Землю из космоса выпало огромное количество так называемых тектитов — микроскопических стеклянных шариков, общая масса которых

достигала нескольких миллиардов тонн. Вполне возможно, что значительная их часть не достигла поверхности Земли и в виде аэрозолей осталась на околоземной орбите. Из них сформировалось гигантское кольцо, подобное кольцам Сатурна. Тень от аэрозольного кольца тектитов экранировала солнечные лучи, и зима становилась более суровой. Просуществовав несколько миллионов лет, аэрозольная кольцевая система распалась, оставив по себе память в виде многочисленных останков животных, которые не сумели выжить в новом климате.

### **НА ПЫЛЬНЫХ ТРОПИНКАХ ДАЛЕКИХ ПЛАНЕТ...**

Вряд ли автор известной песни задумывался над тем, что в атмосфере планет Солнечной системы есть аэрозоли, но в действительности так оно и оказалось. За 20 лет (1966—1986 гг.) СССР и США направили к планетам более 30 межпланетных автоматических станций. Совместно с наземными наблюдениями и исследованиями космонавтов и астронавтов эти станции принесли нам достоверные сведения о планетах и их спутниках, а также об аэрозолях этих планет.

Одной из первых планет, изучение которой проводилось с помощью различных космических кораблей, была Луна. Оказалось, что ее поверхность покрыта слоем шарообразных оплавленных частиц, диаметр которых не превышает 100 мкм. Внешние воздействия — удары метеоритов, сейсмические волны, посадка космических кораблей обуславливают переход частиц этого слоя в аэрозольное состояние. Плотность лунной атмосферы в  $10^8$  раз меньше плотности атмосферы у поверхности Земли. Столь разреженная атмосфера способствует тому, что частицы, каким-либо образом выброшенные с поверхности Луны, будут двигаться по определенным траекториям, не встречая сопротивления. Иными словами — в лунной атмосфере аэрозольные (точнее астрозольные) частицы не могут находиться во взвешенном состоянии. Поэтому лунные аэрозоли неустойчивы и быстро оседают, хотя лунное притяжение в шесть раз слабее земного.

Систематические исследования атмосферы планет и комет Солнечной системы позволили сделать опре-

деленные заключения об аэрозольном составе небесных тел.

Атмосфера планеты Марс сильно разрежена (давление в 200 раз слабее земного), содержит в основном углекислый газ (95%) и немного водяного пара; возможно присутствие азота и аргона. Облака в марсианской атмосфере находятся на высоте от 10 до 40 км. Каков состав марсианских облаков, ведь воды в атмосфере планеты мало? Если воду осадить, то получится слой толщиной всего около 5 мкм. Учитывая, что атмосферное давление незначительно, можно считать, что относительная влажность не велика. Такого количества воды на Марсе явно недостаточно для формирования марсианских облаков.

Основным веществом, из которого образуются марсианские аэрозоли, а затем и покров планеты, может быть углекислый газ. Морозы на неосвещенной части планеты достигают порой —  $80^{\circ}\text{C}$ ; в этих условиях углекислый газ конденсируется и образует знакомый нам сухой лед, такой, который используют земляне для хранения мороженого.

Однако не стоит обольщаться, так как условия для образования кристаллов углекислого газа зависят от времени года, т. е. от положения Марса относительно Солнца. Температура на поверхности планеты в летнее время может достигать  $+10^{\circ}\text{C}$ . При низком атмосферном давлении и относительно высокой температуре углекислый газ (диоксид углерода  $\text{CO}_2$ ) не может оставаться твердым. Тем не менее даже в этих условиях сохраняется белый покров планеты. Это подтверждает возможность образования газовых гидратов — одной из разновидностей соединений включения, называемых клатратами, о которых речь шла в начале книги (стр. 18—20).

Как уже отмечалось, небольшое количество молекул воды, которые имеют кристаллическую структуру, в качестве «хозяев» принимают большое количество молекул «гостей», а данном случае молекул  $\text{CO}_2$ . Образуются ассоциаты, которые могут существовать при положительных температурах. Они-то и формируют аэрозоли и покров поверхности планеты. Поэтому можно утверждать, что влага в атмосфере Марса сосредоточена главным образом в аэрозолях, находящихся в состоянии газовых гидратов. В зависимости



от времени года вода может из гидратов переходить в газовую фазу или замерзнуть, т. е. содержание газовых гидратов в атмосфере Марса все время меняется.

Сильно разреженная атмосфера Марса способствует неустойчивости аэрозолей и быстрому оседанию аэрозольных частиц. Предполагают, что осевшая часть марсианских аэрозолей также принимает участие в формировании поверхности планеты в виде так называемых ледяных отливов.

Таким образом, марсианские аэрозоли и образующийся на поверхности планеты лед — это преимущественно затвердевший углекислый газ, либо газовые гидраты (клатраты) на его основе (скорее всего — клатраты).

Нептун, Уран и Сатурн имеют достаточно плотную и протяженную атмосферу. Кольца Сатурна состоят из миллионов спутников размером от гальки до булыжника, которые остаются на постоянных орбитах вследствие гравитационного воздействия планеты. Гравитация способствует также компактному размещению частиц в сгустках и предотвращает превращение их в пыль.

Юпитер — крупнейшая из планет; его масса в 2,5 раза превышает массу всех остальных планет, вместе взятых. Он имеет 14 спутников. Плотность Юпитера чуть больше плотности воды, на планете отсутствует твердая поверхность. Атмосфера Юпитера высотой в тысячу километров на 98% состоит из водорода и гелия; в небольших количествах обнаружен метан, аммиак и другие вещества. Поверхность Юпитера всегда закрыта облаками, имеющими различную окраску — голубую, желтую, красную. Предполагается, что облака состоят из кристаллов аммиака и гидросульфида аммония, которые и придают облакам специфическую окраску. На Юпитере выпадает клатратный снег — аммиачные и сероводородные дожди. Достичь поверхности они не в состоянии из-за повышенной температуры (100 °C). В результате снег возгоняется, а капли испаряются, и вещества в парообразном состоянии снова возвращаются в облака.

Космические аппараты «Пионер» и «Вояджер» передали на Землю многочисленные снимки Юпитера. 4 марта 1979 года произошло сенсационное откры-

тие — вокруг Юпитера обнаружены кольца. До этого времени астрономы были уверены, что кольца есть только у Сатурна и Урана. Кольца вокруг Юпитера состоят из пылевидных частиц, они расположены от центра планеты на расстоянии 128 000 км. Эти кольца образуют 95 концентрических полос и толщина их всего 130 км, что значительно уже колец Сатурна. Частицы, из которых формируются кольца, движутся по индивидуальным круговым орбитам с периодом 5—7 часов и седиментационно неустойчивы; поэтому они могут вновь возвращаться на планету. Невероятной оказалась структура одного кольца, которое состоит из трех отдельных колец, сплетенных в жгут.

У одного из спутников Сатурна — Титана плотная атмосфера с давлением у поверхности 1,5 атм и температурой — 170 °С. В его газовой среде помимо азота найдены метан и синильная кислота, что создает условия для образования в атмосфере планеты аэрозолей.

В атмосфере некоторых других планет аэрозоли не обнаружены. Так, Меркурий не имеет облаков; по одним данным он лишен атмосферы вообще, по другим сведениям на нем имеется водородная атмосфера с плотностью в 100 раз меньшей плотности воздуха.

Имеющиеся сведения о составе атмосферы холодных планет Солнечной системы позволяют сделать предположение о том, что аэрозольные частицы присутствуют там в виде газовых гидратов; не исключена возможность существования таких соединений в атмосфере Урана, Нептуна, Сатурна, Юпитера и некоторых спутников этих планет. Дальнейшие исследования «пыльных тропинок» различных планет, безусловно, будут обогащены новыми сведениями об их аэрозолях.

### **«ВЕГИ»**

Автоматическая межпланетная станция «Вега-1» стартовала с космодрома Байконур 15 декабря 1984 года, а через 6 дней последовал старт «Веги-2». В июне 1985 года эти станции одна за другой прошли вблизи Венеры. От каждой станции отделились спускаемые аппараты, которые в свою очередь выса-

дили на Венеру своеобразный десант в виде посадочных аппаратов.

Одна из задач проекта «Вега» заключалась в исследовании атмосферных аэрозолей Венеры. Венера — почти двойник Земли по размерам и массе, к тому же ее ближайшая соседка. Эта планета прячет свою поверхность под вечным облачным покровом.

Атмосфера Венеры содержит 96% углекислого газа и около 3,5% азота; по сравнению с земной в ней в 100 раз больше углекислого газа и значительно меньше водяного пара и кислорода. Атмосферное давление у поверхности планеты в 90 раз выше, чем на Земле. Сплошной облачный покров Венеры состоит из нескольких ярусов. Спускаемый аппарат «Веги-1» обнаружил 5 ярусов облаков. Верхняя граница облаков составляет 63 км, а нижняя — 47 км, т. е. облачный слой имеет толщину 16 км.

«Веги» определили состав и размеры частиц дисперсной фазы венерианских облаков. Значительная часть их формируется из капель и кристаллов серной кислоты, диоксида и особенно триоксида серы. Размер капель небольшой — преимущественно 0,4—0,9 мкм. Более крупные частицы (их размер не превышает 20 мкм) формируются в основном из льдинок и имеют несферическую форму.

В отличие от «Вег», зонд американской станции «Пионер — Венера» в 1978 году определил большее число относительно крупных частиц. Возможно, как и в земной атмосфере, аэрозоли Венеры изменяются во времени, а одноразовое определение их состава не дает полных сведений о распределении всех аэрозольных частиц по размерам.

Обнаружен кругооборот венерианских аэрозолей — крупные частицы верхнего яруса оседают и на высоте 51 км испаряются, а затем снова конденсируются или десублимируются, т. е. превращаются в капли или в твердые частицы.

Прямые измерения, проведенные «Вегами» с помощью двух приборов, действующих на различных принципах, показали практически совпадающие результаты по концентрации и составу аэрозолей планеты. В облаках Венеры массовая концентрация серной кислоты примерно в 3000 раз меньше средней концентрации воды в атмосфере Земли. В верхних

слоях облачного покрова Венеры одна аэрозольная частица приходится на 1000 см<sup>3</sup> атмосферы, что значительно ниже концентрации земных аэрозолей.

Полагают, что серная кислота на Венере играет такую же роль, что и вода в земных облаках. Полной аналогии, однако, провести нельзя. В облаках Венеры обнаружены сера, хлор и даже фосфор. Часть серы находится в свободном виде; эта сера придает облакам желтоватую окраску.

Облака и атмосфера Венеры влияют на ее климат. Солнечная радиация проникает через облачный слой, нагревает атмосферу и поверхность планеты. Нагретая планета излучает тепло, но значительная его часть поглощается углекислым газом и отражается облаками. Поэтому тепловое равновесие между притоком и излучением тепловой энергии установилось на Венере при температуре ее поверхности в 475 °С (для сравнения: температура плавления свинца 327,4 °С). Наиболее интересная часть проекта «Веги» заключалась в исследовании кометы Галлея. Космическим аппаратам удалось впервые «увидеть» в комете то, что неуловимо для наземных телескопов.

«Вега-1» встретила с кометой 6 марта, а «Вега-2» — 9 марта 1986 года. Аппараты прошли на расстоянии 8900 и 8000 км от ядра кометы. Ядро кометы Галлея представляет собой вытянутое монолитное тело, размеры которого 14 км по большой оси и 7 км в поперечнике. Оно выполняет функции своеобразного генератора аэрозолей, из которых формируется хвост кометы. Каждые сутки около миллиона тонн космической пыли и пара покидают ядро кометы. Такая «производительность» при ограниченных размерах ядра кометы возможна лишь при условии, когда испарение происходит по всей поверхности. Пока еще неясно, каким образом восполняется убыль ядра кометы Галлея и идет ли этот процесс вообще, но несомненно, что это восполнение может происходить только за счет атмосферы, окружающей эту комету.

Поверхность кометы, как и некоторых других планет, покрыта клатратами — соединениями включения, формирующими своеобразный ледяной панцирь. Приборы «Вега» установили, что ледяная поверхность черная, а ее отражательная способность менее 5%.

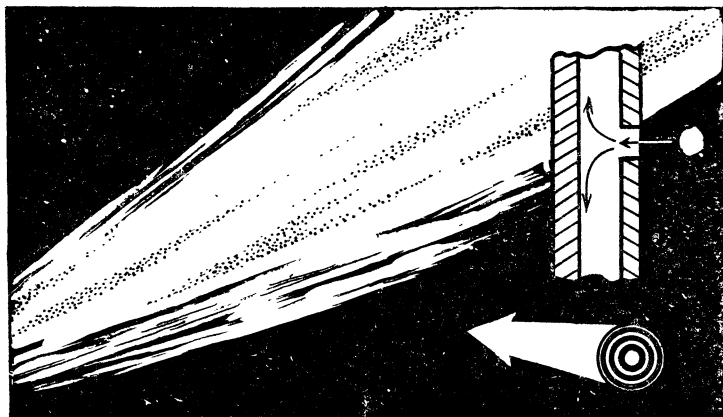
Температура ее непомерно высока (составляет сотни градусов). Такое невероятное противоречие объяснимо, если вспомнить сугробы, загрязненные весенним снегом. Лед и тугоплавкие частицы экранированы от внешнего пространства слоем черного пористого вещества с низкой теплопроводностью. Толщина этого слоя незначительна: от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Поверхностный слой воспринимает солнечное излучение, часть которого все же передается ледяному панцирю. Лед нагревается, а испарившиеся молекулы воды проходят сквозь верхний черный слой и покидают комету, увлекая за собой частицы пыли.

Когда верхний изоляционный слой уплотняется настолько, что поры практически в нем отсутствуют, происходит его взламывание, которое сопровождается направленным выбросом веществ. Изоляционный слой восстанавливается очень быстро; для этого требуется менее суток.

«Веги» — не первые космические аппараты — исследователи кометы Галлея. Четыре года (с марта 1983 г. по март 1987 г.) работала советская астрофизическая станция «Астрон». На станции был установлен уникальный автоматический оптический телескоп диаметром 0,8 м, предназначенный для исследования ультрафиолетового излучения звезд, туманностей и галактик. При помощи этого автотелескопа в течение восьми месяцев, с декабря 1985 года по июль 1986 года, велось систематическое наблюдение за кометой Галлея на расстоянии около 200 000 км. Удалось определить массу выбросов кометы за одно сближение с Солнцем. Выбросы идут на образование космических аэрозолей; они составили 370 миллионов тонн — небольшую часть (примерно 0,01%) массы ядра кометы. Заметим, что программа работы станций «Астрон» предусматривала наблюдение не только за скоплением звезд, но и за пылью и газом, т. е. аэрозольными системами галактик.

### **«ВЕГИ» ВЕДУТ «ДЖОТТО»**

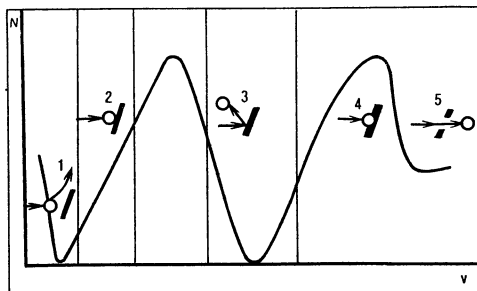
«Веги» пролетели на расстоянии чуть меньше 10 000 км от ядра кометы Галлея. Такая дистанция была выбрана не случайно. Встреча земных послан-



Частичка, летящая с громадной скоростью, пробивает внешнюю обшивку космического корабля

цев с кометой происходила на слишком большой скорости и пыль хвоста кометы, подобно бронебойному снаряду, прошла наружную поверхность корабля. Частичка массой в 1 мг, летящая со скоростью 80 км/с, столкнувшись с алюминиевым листом, может пробить в нем отверстие диаметром 10 мм. У «Вега», в отличие от станций типа «Венера», внешняя поверхность аппарата имела двойную металлическую обшивку. Ударяясь о первый слой, который выполняет роль «фальшброни», летящие частицы гасят свою скорость, а образовавшаяся в этом месте плазма растекается по второму слою обшивки. Пробойная сила космических частиц гасится первым слоем, а второй слой остается невредимым.

«Вега» удалось определить состав и размеры около 2000 индивидуальных космических частиц пылевого облака, извергаемого кометой Галлея. Химический состав этих частиц оказался очень сложным. Обнаружены частицы с преобладанием таких металлов, как натрий, магний, кальций, железо и некоторых других, преимущественно в виде силикатов. Есть частицы, в которых наряду с металлами содержится значительное количество углерода. Присутствие кислорода и водорода свидетельствует о возможности образования молекул воды. Неожиданным оказалось распределение частиц по размерам — среди них много таких, размеры которых составляют



От чего зависит число осевших частиц ( $N$ ) при увеличении их скорости ( $v$ )?

доли микрометра, т. е. относящихся к высокодисперсным системам.

Газ, который испаряется с ядра кометы и увлекает космические частицы, ионизируется солнечным излучением и распространяется в межпланетную среду со скоростью около 1 км/с. Газопылевая масса кометы заворачивает свой хвост длиной в десятки миллионов километров в направлении, строго противоположном солнечному ветру.

После «Вега» к комете Галлея был направлен космический аппарат «Джотто», созданный совместными усилиями ряда стран Европейского космического агентства. При разработке траектории полета «Джотто» были учтены трассы «Вега», что позволило более точно попасть в цель. Ведомый «Вегами» «Джотто» проник в пылевое облако кометы и пересек его. Такое пересечение, однако, обошлось дорого кораблю — его внешняя обшивка превратилась в решето.

У аппарата «Джотто», как и у «Вега», многослойная обшивка. Внешний ее слой состоит из алюминия, а второй — из материала «кевлар», который применяется для изготовления пуленепробиваемых жилетов.

Последствия встречи космических частиц и метеоритов с космическими аппаратами зависят от их относительной скорости, от массы аэрозольных частиц и направления движения этих частиц по отношению к поверхности летящего аппарата. Как видно из рисунка, при относительно небольших скоростях и при наличии газовой среды частицы способны по инерции обтекать поверхность (1). При увеличении скорости

частиц преодолевается их инерция и они приобретают возможность достигнуть препятствия (2). Дальнейший рост скорости частиц приводит к упругому отскоку (3) и снижению числа осаждающихся частиц. Если скорость частиц соответствует космической, то частицы внедряются в поверхность (4) материала или даже пробивают его (5).

В отсутствие газовой среды решающее значение приобретает угол встречи частиц с поверхностью. По этой причине помимо многослойной обшивки наиболее уязвимые поверхности космических кораблей располагают под углом к направлению возможной встречи с космическим «гостем», обеспечивая касание, а не удар частиц.

Такие меры оказались весьма эффективными. Изрешеченная межпланетная станция «Джотто», поверхность которой каждую секунду испытывала удары 120 космических частиц, прошла примерно в 500 км от ядра кометы Галлея. При этом станция сохранила работоспособность и передала на Землю необходимую информацию.

### **«ТИГР», НЕ ПОХОЖИЙ НА ТИГРА**

Для «Вега» и «Джотто», которые были направлены в хвост кометы Галлея, встреча с космическими аэрозолями была неизбежной и ожидаемой. Конструкторы аппаратов заранее позаботились, чтобы эта встреча не закончилась трагически.

При полетах на околоземных орбитах космические аппараты могут случайно встретиться с космическими частицами различного происхождения и метеоритами небольших размеров, которые оказывают воздействие на оптические приборы и иллюминаторы. За один месяц полета 1 см<sup>2</sup> поверхности космического аппарата испытывает воздействие в среднем одной частицы. Поверхность станции «Мир» может повстречать почти миллион подобных частиц ежемесячно.

Во время продолжительного функционирования орбитальных станций удалось определить не только вероятность встречи с космическими частицами, но и определить последствия этих встреч. От удара микрометеоритов могут образоваться кратеры диаметром более 4 мм. Так, на пластинах, которые крепи-



лись на поверхности станции «Салют-6» и затем были доставлены на Землю, обнаружено до 200 следов от микрометеоритов. Размер большинства кратеров составлял 10—50 мкм. Американские астронавты исследовали шестнадцать иллюминаторов космического корабля «Джемини». За 20 суток полета появились 108 кратеров диаметром более 100 мкм.

Обычно микрометеориты встречаются с иллюминаторами космических кораблей сравнительно редко. «Повезло» станции «Салют-4», которая в июле 1975 года прошла через плотный метеоритный рой. В течение трех суток было зарегистрировано два удара по одному и тому же иллюминатору довольно крупных метеоритов и 50 более мелких ударов. В последующие 200 суток полета не было зарегистрировано ни одного удара.

По размеру кратера, относительной скорости соударения и плотности метеоритных тел можно определить массу и диаметр частиц. Для станции «Салют-4» они составляли соответственно  $2 \cdot 10^{-6}$  г и 130 мкм.

Экипажи орбитальной станции «Мир», которая вышла на орбиту еще в феврале 1986 года, систематически ведут эксперимент с загадочным названием «Тигр». Не наблюдение за полосатыми красавцами в космосе и их прыгучестью в невесомости предусматривает этот эксперимент. Цель его более скромная — определить поведение стекол иллюминаторов при встрече с небесными посланцами.

Поверхность стекол под действием удара космических тел подвергается эрозии — образуются сколы, трещины и другие дефекты. Даже небольшие повреждения скажутся на точности оптических измерений, поскольку в местах эрозии изменяется яркость фона от воздействия солнечных лучей. Серьезные повреждения могут нарушить целостность иллюминаторов и привести к разгерметизации корабля, а это уже недопустимо. Поэтому помимо внешней обшивки кораблей иллюминаторы делают также многослойными.

Итак, космические аэрозоли стали доступны для широких исследований. Джинну не удалось скрыться в бескрайних просторах космоса.

Еще в начале 30-х годов, когда освоение космоса было только мечтой, академик В. И. Вернадский указывал на наличие обмена веществом и энергией

между нашей планетой и космической средой. Сведения об этом обмене, в котором участвуют аэрозоли, в настоящее время подтверждаются прямыми экспериментами.

## **ДЖИНН — ТРУЖЕНИК**

### **И ЖНЕЦ, И ШВЕЦ...**

Так говорят об умельце, мастере на все руки. У аэрозолей множество «профессий». Мы перечислим лишь некоторые, наиболее типичные.

Первое место по масштабам применения принадлежит аэрозолям жидких и твердых топлив. Чтобы повысить скорость сгорания топлива, необходимо создать высокую концентрацию веществ в небольшом объеме. Путем насыщения газовой среды парами топлива при обычном давлении требуемую концентрацию создать невозможно. На помощь приходят аэрозоли: в аэрозольном состоянии резко повышается концентрация топлива и возрастает скорость сгорания, которое происходит по всей поверхности раздробленного топлива. В процессе сгорания джинн превращается в самого себя, т. е. в существо из огня и воздуха, точнее, газа.

Процесс горения определяется свойствами веществ, из которых образована дисперсная фаза аэрозолей. Жидкие углеводороды, к числу которых относятся получаемые из нефти продукты, имеют низкую температуру кипения (50—150 °С). Окисление идет медленно, а испарение — интенсивно, поэтому горение жидких углеводородов происходит в паровой фазе. Углерод угля и других твердых топлив, напротив, газифицируется при температуре выше температуры его горения; сублимация идет медленно и паров горючего в воздухе мало. Окисление и горение происходит на поверхности аэрозольных частиц.

Аэрозольное состояние топлива в цилиндрах дизельных двигателей способствует его воспламенению; при сжатии воздуха в цилиндре он нагревается до высокой температуры. Быстрое и непосредственное впрыскивание распыленного в аэрозоль топлива обу-

словливает его равномерное сгорание и приводит к тому, что дизельные двигатели на 20—25% экономичнее карбюраторных.

Для того чтобы испарение и сгорание происходило одновременно, желательно, чтобы капли топлива были одного размера. Экспериментально установлено, что капли дизельного топлива должны иметь диаметр 40—50 мкм. Более мелкие капли быстро испаряются, крупные капли продолжают жить. Неодинаковый размер капель приводит к неравномерному сгоранию топлива в факеле, а следовательно, и к снижению его эффективности.

Часто распыляют самую дешевую жидкость — воду. Это делается при тушении пожаров, для очистки воздуха от газов и пыли, охлаждения воды и стенок аппаратов и других целей. При поливе струей влага к растениям попадает по принципу «то густо, то пусто». Орошение дождеванием — еще один способ распыления воды. Он позволяет равномерно распределять воду по всему посеву, подавать ее определенными порциями и в течение требуемого времени, чтобы растения успели усвоить подаваемую влагу.

Особые свойства аэрозолей используют в сельскохозяйственном производстве. Воздушная сортировка сыпучих тел основана на различии скорости оседания частиц в зависимости от размера и формы. Мелкие частички оседают медленнее, чем крупные, а чешуйчатые медленнее по сравнению с шарообразными. Отвеивание зерна от половы — типичный пример подобной сортировки. В некоторых случаях посев осуществляется семенами, распыляемыми из самолетов или вертолетов; это так называемый аэросев. Подобным образом сеют, например, травы и другие растения.

Еще с незапамятных времен для сохранения пищи люди вывешивали рыбу и куски мяса над кострами. Продукты сушились и подвергались воздействию газа и дыма, т. е. копчению. Аэрозольные частицы, которые, собственно, и образуют копильный дым, получаются при сгорании древесины. В их состав входят высококипящие органические соединения, главным образом фенолы, которые могут образовать аэрозольные частицы размером менее 0,1 мкм. Кроме того, в копильном дыме содержатся частички сажи (несго-

ревшего углерода) и золы, подхватываемые горячим газовым потоком. Собственно процесс копчения, в том числе и колбас, заключается в совместном действии газов и высокодисперсных аэрозольных частиц органического происхождения и проникновения веществ в глубь продукта.

В сельскохозяйственной практике применяют жидкие пены, т. е. такие аэрозольные системы типа Ж,Г/Г, дисперсную фазу которых составляют пузырьки газа, разделенные тонкой прослойкой жидкости. На один объем жидкости может приходиться до нескольких сот объемов газа. Это дает возможность проводить обработку больших площадей при сокращенном расходе жидких препаратов. Жидкая аэрозольная пена может перейти в твердую пену, которую используют как теплоизолятор для защиты растений от морозов в бесснежные зимы или для полевого хранения урожая в буртах.

Не менее широко применяются аэрозоли в промышленности. Так, окрашивание изделий при помощи распыленных жидкостей, находящихся в аэрозольном состоянии, уже давно вытеснило малярную кисть, избавив от изнурительного ручного труда.

Аэрозолям находится работа в таких сферах, о существовании которых мы часто не подозреваем. Примером может служить турбоабразивная шлифовка, когда абразивный порошок переводят в аэрозольное состояние и осуществляют шлифовку поверхностей сложной конфигурации в камерах ограниченного объема.

На смену традиционным методам химического анализа приходят методы плазменной фотометрии, характеризующиеся высокой чувствительностью, избирательностью и экспрессностью. Анализируемые вещества переводят в аэрозольное состояние и затем подают в горелку, температура пламени которой может достигать 5000 °С. За короткое время пребывания в зоне пламени частицы быстро испаряются, а вещества могут разложиться, и атомный состав вводимых в пламя веществ определяют по спектрам излучения.

Многие виды технических материалов можно получить только в виде аэрозолей, а в некоторых случаях их образование неизбежно. Так, производство чистого

цинка сопровождается образованием аэрозолей. Цинк легко окисляется, образуя оксид цинка ( $\text{ZnO}$ ), который называют цинковыми белилами. Затем оксид цинка испаряется и на воздухе десублимируется, превращаясь в аэрозоль. Образующиеся в процессе производства в качестве побочного продукта аэрозольные частицы улавливают и в дальнейшем широко используют в промышленности, в частности при органическом синтезе.

Для совершенствования некоторых технологических процессов и получения новых композиционных материалов необходимы высокодисперсные порошки, частицы которых состоят порой всего из нескольких десятков молекул. Мельчайшие частички некоторых порошков можно получить лишь из аэрозольного состояния. Для этого вещества переводят в пересыщенный пар, при быстром охлаждении которого происходит десублимация и возникают мелкие частички (подобный процесс, рассмотренный ранее, имеет место в атмосфере, когда из пересыщенных паров воды образуются кристаллики облаков). Мельчайшие частички можно получить также при встрече холодного воздуха с плазмой, содержащей пары вещества. Такие порошки, например, обладают высокой каталитической активностью. Их применяют в качестве наполнителей полимеров и для других целей.

Высокодисперсные металлические порошки (бора, алюминия и др.), обладающие значительной теплотой сгорания, добавляемые в ракетное топливо. При работе двигателя они переводятся в аэрозольное состояние. Повышенная теплота сгорания, большая удельная поверхность порошков способствует быстрому сгоранию топлива в аэрозольном состоянии, образованию газовой струи и повышению эффективности реактивных двигателей.

Тяга реактивных двигателей определяется массой и скоростью проходящего через сопло вещества. Плотность аэрозольных частиц значительно превышает плотность газа. На этой основе возможно создание реактивных двигателей, работающих без топлива. Для этого нелетучую и негорючую жидкость распыляют на капли в сильном электрическом поле. Образующуюся аэрозольную систему пропускают через линейный ускоритель, в котором заряженные капли разгоняются

со скоростью до нескольких километров в секунду. Затем этот аэрозоль устремляется в сопло двигателя, создавая реактивную тягу. По сравнению с газовой струей за счет дисперсной фазы аэрозоля резко увеличивается масса выбрасываемых из сопла веществ, что значительно повышает тягу реактивного двигателя. Подобный двигатель может успешно работать и в вакууме (т. е. на очень большой высоте).

С помощью аэрозолей удается решить ряд технических проблем современной промышленности. В аэрозольном состоянии, например, используют некоторые вещества для охлаждения ядерных реакторов.

Приведенные примеры показывают, что самые распространенные и не очень распространенные вещества эффективны в аэрозольном состоянии. Аэрозоли позволяют интенсифицировать процессы, создавать новые материалы и технологии, влияя тем самым на научно-технический прогресс. Словом, специальностей у аэрозолей множество, перечислить их невозможно, но даже наше беглое знакомство свидетельствует о справедливости заголовка.

В дальнейшем можно будет неоднократно убедиться в многочисленных и разнообразных возможностях раскрепощенного джинна.

## **ЛЕЧИТЬ И СРЕДУ**

При получении дипломов выпускники медицинских вузов дают клятву Гиппократу. Один из основных принципов, которых придерживался знаменитый древнегреческий врач, основоположник античной медицины, состоял в том, что лечить надо не болезнь, а больного, учитывая его индивидуальные особенности и условия жизни. Гиппократ первым применил для лечения ингаляции (от латинского *inhalo* — «вдыхаю»). Собственно, этот способ восходит еще к доврачебным временам, когда больных подвергали окуриванию, т. е. воздействию аэрозолей, образующихся при сжигании целебных трав и растений (мяты, листьев лавра, игл сосны и др.). Можно вводить в организм лекарственные препараты в виде паров, но концентрация полезных веществ в них неизмеримо меньше по сравнению с той концентрацией, какая достигается в аэрозольном состоянии; ингаляциям и сейчас отво-



Всем знакомая лечебная процедура имеет прямое отношение к аэрозолям

дится важная роль в лечении заболеваний дыхательных органов.

Аэрозоль-ингаляционная терапия основана на фильтрующей способности дыхательного тракта и избирательном осаждении частиц различного размера на его участках. Для того чтобы препараты проникли к поверхности легочных альвеол, размер частиц не должен быть слишком большим, по крайней мере не больше 20 мкм.

Помимо жидких нередко применяют препараты в виде суспензий, когда твердые частицы находятся в жидкой среде. Препараты распыляются на капли, содержащие твердые частицы. В таком виде можно применять пенициллин и порошки, которые назначают, например, для профилактики силикоза.

Путем ингаляции можно вводить в организм витамины, антисептические и терапевтические препараты, анестезирующие средства, вакцины. Аэрозольная вакцинация применяется для борьбы с гриппом (введением препарата в нос). Особенно эффективны аэрозольные вакцинные препараты в ветеринарии, позволяющие одновременно обрабатывать большие группы животных. В виде аэрозолей могут использоваться жидкие и порошкообразные вакцины с различными добавками.

Аэрозольный метод иммунизации является безвредным и щадящим. При той же эффективности препаратов аэрозольный метод менее токсичен, чем подкожные прививки, а о его производительности говорить не приходится. Введению препаратов путем ингаляции нет альтернативы: отсутствуют другие способы, которые позволили бы доставить в дыхательный тракт необходимое количество препарата.

Через среду частицы дисперсной фазы аэрозолей

могут быть направлены с потоком газа или воздуха не только в дыхательный тракт, но и туда, где они необходимы (вспомним пульверизатор для одеколона). Направленное движение частиц позволяет осуществить аэрозольную обработку кожного покрова животных. После попадания аэрозоля на обрабатываемые участки капли сливаются, образуя жидкую пленку. «Работает» лишь тонкий слой жидкости, непосредственно примыкающий к кожному покрову, остальная жидкость фактически не используется. Снижение расхода препарата достигается при помощи аэрозольной пены, наружная оболочка которой выполняет лечебные функции более эффективно.

Для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных и птиц применяют биостимуляторы: витамины, ферменты, тканевые и другие препараты. Снабдить порцией биостимулятора каждого из десятка тысяч животных и птиц поодиночке практически невозможно. В ход идут аэрозоли — препараты через среду попадают в корм или на кожные покровы животных. Сравнительно небольшой концентрации аэрозолей, всего  $5 \text{ мг/м}^3$ , оказывается порой достаточно для того, чтобы тканевый биостимулятор активно воздействовал на цыплят.

Иногда приходится лечить и саму среду. Такая необходимость возникает, когда возбудителями болезней становятся бактериальные аэрозоли (микроорганизмы, вызывающие инфекционные заболевания). Они могут образоваться в помещениях при кашле и чихании, а также заноситься одеждой вместе с пылью. В течение дня человек может выделить до миллиона микроорганизмов, значительная часть которых превращается в бактериальные аэрозоли.

В инкубационных отделениях инкубаторов существует реальная возможность распространения инфекции. Аэрозольная обработка дезинфицирующими растворами приводит к обеззараживанию воздуха инкубаторов и поверхности яиц, что способствует получению здорового потомства. В ветеринарии для исключения повторной вспышки болезней дезинфекцию воздуха в помещении проводят несколько раз. Концентрацию веществ подбирают таким образом, чтобы микроорганизмы погибали, а аэрозольное заражение животных исключалось.



Таким образом, аэрозоли позволяют расходовать препараты более эффективно, лечить и больных и среду.

### ПОПАСТЬ В ЯБЛОЧКО

С появлением земледелия возникла и необходимость защиты растений от вредителей, болезней и сорняков, причем чем интенсивнее ведется земледелие, тем эта необходимость настоятельнее. Затраты на защиту растений становятся соизмеримыми со средствами, расходуемыми на их подкормку и на удобрение почвы, и могут составить 2—3% от вложений в сельское хозяйство; потери же от вредителей, болезней и сорняков могут «съедать» иногда 20—30% валового урожая.

Все средства защиты растений называют пестицидами. К их числу относятся инсектициды, уничтожающие вредных насекомых; фунгициды, которые защищают растения от возбудителей грибковых болезней; гербициды, применяемые для уничтожения сорняков. Около половины всех используемых пестицидов расходуется для обработки зерновых и зернобобовых культур. Пестициды применяют в виде растворов в воде или в минеральном масле, а также в виде эмульсий или суспензий.

Небольшую часть препаратов используют как тонкие порошки-пудры (дусты).

На растение требуется нанести всего несколько капель или твердых частиц препарата. Но как? Сколько труда надо было бы затратить, если бы на каждое растение пришлось наносить капли из пипетки! По-видимому, для этой цели потребовалось бы привлечь в несколько раз больше людей, чем для уборки хлопка вручную.

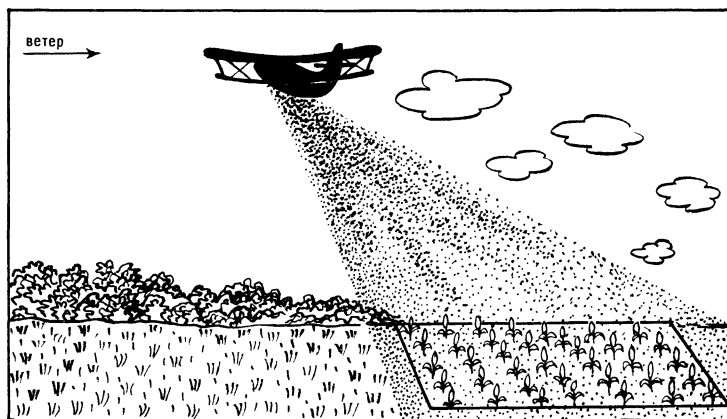
Вот здесь на помощь приходят аэрозоли. Препарат переводят в аэрозольное состояние, чтобы его капли (или частицы) могли осесть и попасть в «мишень», т. е. на обрабатываемые посевы. Попадание в мишень — это еще не достижение цели. Нужно угодить в «яблочко». Если в качестве препарата применяют инсектициды, то необходимо достичь покрова насекомых; гербициды должны найти и поразить сорняк, а фунгициды — попасть в растение.

Джинн выступает в роли посредника: его сначала выпускают из бутылки, чтобы затем в виде множества частиц вновь вернуть на землю, но не просто вернуть, а так, чтобы он нашел горлышко именно нужной «бутылки».

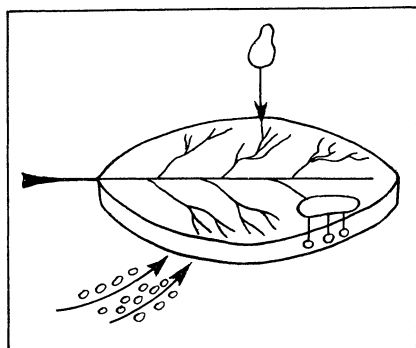
Неоспоримое преимущество пестицидов в аэрозольном состоянии — простота и доступность — вступает в противоречие с необходимостью попасть сначала в мишень, а затем и в яблочко. Рассмотрим по существу это противоречие. Почти 75% всех посевов обрабатываются опрыскиванием, когда в результате распыления жидкого препарата образуются капли. Попасть в мишень в этом случае не так-то просто, этому препятствует снос капель ветром.

...Знаменитые фонтаны Петродворца, среди них — царь всех фонтанов, Самсон. Струйки фонтана дробятся на капли и сносятся ветром за пределы каскадной лестницы. Впрочем, снос капель фонтана и применяемых для обработки полей жидких пестицидных препаратов — дело обычное. Попадает в мишень далеко не весь препарат. Обратимся к рисунку, на котором схематически показано, как ведется обработка посевов с воздуха. Крупные капли, у которых скорость оседания значительна, попадут на почву еще до передней границы посева. Мелкие капли сносятся ветром за пределы дальней границы. В итоге часть препаратов пропадает. Чтобы уменьшить потери препарата, авиационную обработку нужно проводить при слабом ветре, скорость которого не должна превышать 3 м/с. При использовании наземной аппаратуры граничная скорость ветра будет 4 м/с.

Ветром сносится добрая половина препарата, а той частью, которая все же попала в мишень, яблочко поражается далеко не всегда. Покажем это на примере инсектицидов. Относительно крупные капли осядут быстро, но попадут они только на те листья, которые находятся на верхней части кроны. Букашки же обычно прячутся в гуще растений. Так что любой лист для вредителей становится своеобразным зонтиком. Необходимо, чтобы капли попали под зонтик, сделав свое дело. Вот почему важно подобрать интервал размеров капель инсектицидных препаратов, определив минимальный и максимальный диаметр.



Попасть в яблоčko  
не так-то просто...



Лист не только зонтик

Капли препарата должны сравнительно быстро оседать и увлекаться воздушным потоком, проникая в «глубинку» растения и поражая там насекомых. Установлено, например, что при опрыскивании инсектицидами полей и лесов насекомые поражаются каплями преимущественно диаметром 20—30 мкм.

Из общего количества препарата, попавшего на посевы, т. е. в мишень, яблочка достигает не более 50%. С учетом потерь за счет непопадания в мишень и в яблочко фактическая доля препарата, которая используется по прямому назначению, снижается до 10—20%. Огромные потери пестицидных препаратов не только экономически невыгодны, но и приводят к пагубным последствиям, которые будут рассмотрены ниже. Медаль помимо парадной лицевой стороны

имеет теневую оборотную сторону. При использовании пестицидных препаратов принцип «чем больше, тем лучше» не верен. Поэтому нормы расхода препаратов строго ограничены.

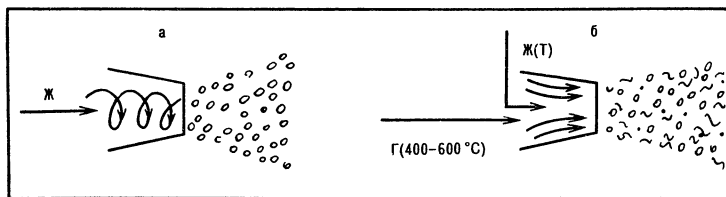
Повышения эффективности использования пестицидов можно достигнуть за счет подбора размеров капель препарата и закрепления препарата на листьях растений и на покровах насекомых. Возникает некоторое противоречие: с одной стороны, крупные капли (диаметром более 60 мкм) не сносятся ветром и лучше достигают цели, но, с другой стороны, относительно мелкие капли лучше проникают в крону растений, более эффективны.

Нахождение оптимальных для данного препарата размеров капель и использование его с наибольшей эффективностью было и остается одной из основных задач экологически безвредного применения пестицидов. Постоянного оптимального размера капель аэрозолей для всех случаев и условий, однако, не существует. Это объясняется совокупным влиянием многих факторов, в частности свойств самого препарата (его вязкости, плотности и токсичности), способностью препарата прилипать к листьям растения. Кроме того, решающее значение имеют условия применения — скорость и направление ветра, высота полета при обработке с самолета, размер поля и другие факторы.

Пестицидами обрабатывают большие массивы, а количество применяемых пестицидов колоссально. Перевод в аэрозольное состояние больших масс препаратов осуществляется при помощи специальных установок, которые называют генераторами аэрозолей.

Часть генераторов аэрозолей работает по принципу механического дробления жидкости. Наиболее древним из подобных генераторов является сегнерово колесо. В нем жидкость попадает на загнутые радиально расположенные относительно окружности вращения трубочки и дробится на капли. Дробление жидкости может быть достигнуто путем распада струи, вытекающей из калиброванного отверстия, столкновения струй с препятствием или между собой.

Проще всего превратить сплошной поток жидкости в широко расходящийся конус капель при помощи



Аэрозоли можно получать механическим (а) и термомеханическим (б) путем

центробежных распылителей. Жидкость подается тангенциально, т. е. по касательной к поверхности распылителя (см. рисунок). Из камеры закручивания, в которой жидкость движется по винтовым линиям, она затем попадает в сужающуюся часть распылителя. У отверстия жидкость «закручивается» в кольцо, распадающееся затем на пленку и капли.

Распыление жидкости может осуществляться потоком воздуха (или газа). Простейшим генератором аэрозолей является пульверизатор, который мы не раз видели в парикмахерской. Небольшие порции одеколона дробятся воздушным потоком и превращаются в аэрозоли. Для дробления большой массы препарата требуется значительный расход воздуха, причем подавляющая часть энергии воздушного потока тратится на дробление капель и сообщение им определенной скорости. Более экономичны термомеханические генераторы. Принцип их действия таков: в поток горячих газов, температура которых обычно составляет  $400\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , впрыскивается раствор препарата в минеральном масле или в дизельном топливе. Растворитель испаряется и в воздух выбрасывается смесь газа, паров и частиц препарата. При попадании в окружающий холодный воздух пары конденсируются и образуют капли аэрозоля. В качестве высокопроизводительных наземных генераторов аэрозолей этого типа могут использоваться авиационные турбореактивные двигатели, отработавшие ресурс на самолетах. Эти двигатели создают мощную струю газов, куда впрыскивается аэрозольный препарат. Производительность такого генератора — до 400 кг дисперсной фазы аэрозолей в минуту. Генераторы подобного типа используются для борьбы с гнусом.

При помощи генераторов можно создавать аэрозо-

ли с различной дисперсностью и тем самым повышать эффективность использования пестицидов.

В заключение отметим, что нельзя лечить одно и калечить другое. Нет сомнений в пользе пестицидов, а об отрицательных последствиях чрезмерного и бесконтрольного их применения речь пойдет дальше.

### **НЕ НАГРЕВАТЬ ВЫШЕ 50°С! \***

Автомобиль повело в сторону — прокол! Теперь снимать колесо, разбортовывать, клеить камеру, собирать — возни на час, не меньше. Но что это? Водитель подсоединяет к вентилю колеса аэрозольный баллончик и нажимает на головку. Подождав две минуты, он подкачивает шину до нормального давления — ремонт закончен, можно продолжать путь. Аэрозоль клеящего вещества под давлением заполнил поврежденную камеру и, продавливаясь через прокол, заклеил его.

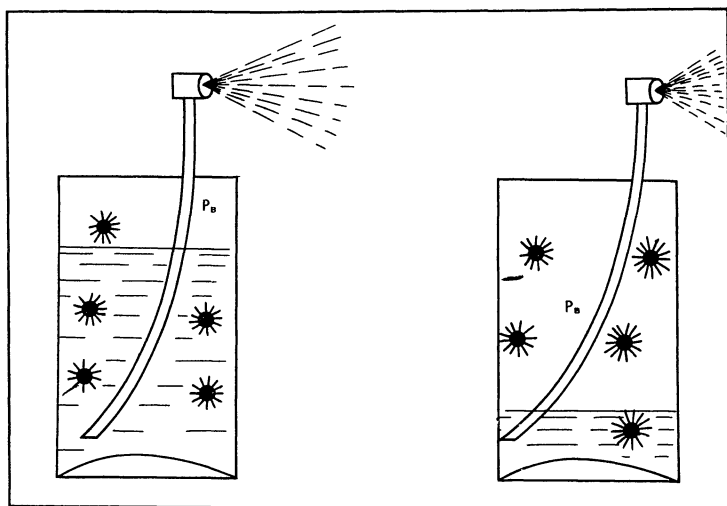
Аэрозольные препараты, заключенные в аэрозольной упаковке (баллончики), могут снимать статическое электричество, наносить краски и создавать покрытия из них, чистить водопроводные трубы, склеивать детали и многое другое.

Еще каких-нибудь 20—30 лет тому назад аэрозольные упаковки были редкостью. Удобство, простота и дешевизна способствовали их массовому применению, и теперь ежегодный выпуск достигает десятков миллиардов штук. Аэрозольные упаковки по сравнению с другими способами получения аэрозолей (например, обычной пульверизацией) дают возможность получать капли заданных размеров. При использовании масла для загара, средств для чистки стекол и некоторых других препаратов капли должны быть относительно крупными, иначе они просто не долетят до цели и осадут. Напротив, если возникает необходимость препарату находиться в воздухе и витать продолжительное время (например, при распылении освежителей), то капли должны быть относительно мелкими.

Аэрозольные упаковки просты по устройству, автономны (не требуют посторонних источников для

---

\* Таким предупреждением маркируются корпуса аэрозольных упаковок.



Аэрозольная упаковка в работе

создания давления) и всегда готовы к применению. Активное вещество подбирают в соответствии с назначением препарата. Если это освежитель воздуха, то в его состав должны входить вещества, которые придают аэрозолям соответствующий аромат.

Аэрозольная упаковка состоит из корпуса (баллончика), герметически закрытого клапаном с распылителем. Сифонная трубка предназначена для подачи препарата к распылителю, который позволяет регулировать расход препарата.

В аэрозольной упаковке помимо активного вещества, из которого образуется аэрозоль, содержится пропеллент, т. е. вещество, создающее избыточное давление в корпусе упаковки. За счет этого давления препарат подается в распылитель и дробится на капли. Поскольку дисперсная фаза аэрозолей зависит от фазового состава и свойств активного вещества, могут образоваться различные виды аэрозольных систем (туман, дым, смог или аэрозольная пена).

Существенная особенность аэрозольных упаковок заключается в характерном, только в них осуществляемом способе создания избыточного давления. Представим себе сосуд с жидкостью, над поверхностью которой находится сжатый воздух или какой-либо

другой газ. После открытия клапана под давлением сжатого газа часть жидкости покидает сосуд. Если, например, объем газовой подушки увеличится вдвое, то избыточное давление снизится во столько же, в данном случае — тоже вдвое. Избыточное давление, в свою очередь, определяет расход препарата через распылитель: чем оно меньше, тем меньше препарата переходит в аэрозоль. Короче, из такого сосуда вещество подается неравномерно: то густо, то пусто.

Обычно, чтобы добиться равномерного расхода жидкости, прибегают к разного рода техническим ухищрениям. В аэрозольных упаковках постоянное избыточное давление  $P_v$  и равномерный расход препарата обеспечиваются оригинальным способом. Все дело в пропелленте. Необходимый пропеллент подобрать не так просто. Для этого пригодны такие вещества, которые, прежде всего, способны поддерживать в баллончике постоянное давление; кроме того, они должны легко испаряться при комнатной температуре, быть безопасными и иметь приятный запах. Можно было бы использовать бутан, но запах у него неприятный и к тому же он горюч.

Среди множества химических соединений наиболее приемлемыми пропеллентами оказались различные виды фреонов — сжиженных фторхлоруглеродов (от латинского frigore — «холод»). Часто используют фреон-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ). Для фреонов характерно высокое давление паров и низкая температура кипения. Так, фреон-12 при 760 мм рт. ст. имеет температуру кипения 29,8 °С. Фреоны могут находиться вместе с активным веществом в виде смеси, либо для них отводят отдельный отсек корпуса, если фреон реагирует с препаратом.

При нажатии на распылитель под давлением сжатого газообразного пропеллента жидкость поступает в распылитель, дробится там на капли и выходит из отверстия в виде аэрозоля. По мере опорожнения баллончика давление в нем падает. Это немедленно приводит к «вскипанию» пропеллента и переходу его из жидкости до тех пор, пока давление вновь не достигнет исходного значения. Давление, создаваемое газообразным фреоном, позволяет джину покинуть баллончик.

Таким образом удается поддерживать постоянное



давление в баллончике  $P_v$ , а следовательно, и постоянный расход препарата, даже когда его осталось совсем немного. По мере расходования препарата газовая среда баллончика все время пополняется благодаря испарению жидкого фреона, что и обеспечивает примерно постоянное избыточное давление, независимо от содержания в баллончике препарата.

Сделав свое дело, т. е. переведя содержимое баллончика в аэрозоль, фреон быстро испаряется (о пагубных действиях по разрушению озонового слоя в результате накопления фреонов в атмосфере речь шла выше). В воздухе фактически задерживается лишь аэрозоль, не содержащий фреонов.

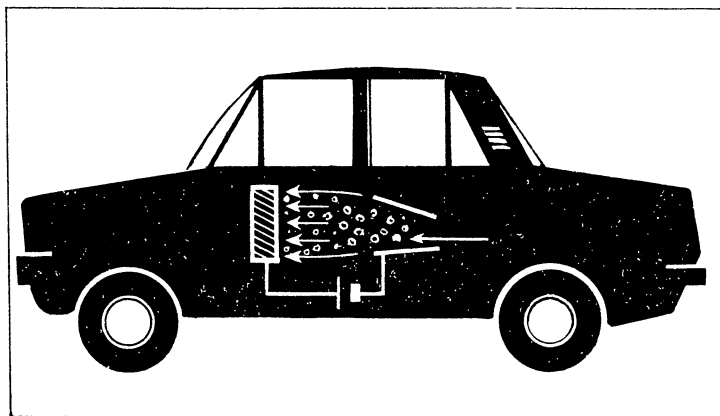
Давление газовой среды в упаковке зависит от температуры. Для смеси фреона-11 и фреона-12 избыточное давление при 20 °С составляет 2,4 атм, а при 40 °С — 5,0 атм. Поэтому не рекомендуется хранить аэрозольные упаковки вблизи нагревательных приборов, а на некоторых из них имеется надпись — не допускать нагревания выше 50 °С. Избыточное давление при повышенной температуре может привести к повышенному расходу препарата, а в некоторых случаях и к нарушению герметичности самого баллончика.

В заключение еще раз отметим: в аэрозольных упаковках могут быть самые различные препараты — инсектициды, лаки и краски, освежители воздуха, средства бытовой химии, парфюмерно-косметические средства, лекарства, пищевые продукты (кремы для украшения тортов, соки), смазки, охлаждающие жидкости, словом, практически любые жидкости и их смеси, что делает этот способ универсальным.

### **ПОСУДА, ЗАМША, БАРХАТ...**

При использовании препаратов в виде аэрозолей некоторая часть, а иногда и значительная, не доходит до цели; потери могут быть огромными. Как их избежать? Один из способов — сообщить аэрозольным частицам электрический заряд.

Заряд аэрозольных частиц, витающих в воздухе, сравнительно невелик — обычно не превышает нескольких десятков элементарных зарядов. Такого заряда недостаточно, чтобы в электрическом поле



Электрическое поле позволяет расходовать препарат более экономно

поток аэрозольных частиц двигался в нужном направлении. Заряд частиц необходимо повысить. Так, в поле коронного разряда максимальный заряд частиц диаметром 10 мкм может достигать уже  $10^4$  элементарных зарядов.

Известны и другие способы заряжения аэрозольных частиц. Остановимся лишь на одном из них, а именно — на действии электрического поля. Оно не только сообщает частицам определенный заряд, но и, подобно жезлу регулировщика движения, способно направлять поток аэрозольных частиц в нужное место. Поясним действие электрического поля на примере электроокраски.

При обычном окрашивании не весь распыляемый препарат попадает на окрашиваемую поверхность; часть его в виде аэрозолей рассеивается в воздухе — это небезопасно и к тому же неэкономно. В электрическом поле капли краски, несущие электрические заряды, направлены движутся к окрашиваемой поверхности. Разработаны различные варианты конструкций распылительных устройств, электродов и методов фиксирования окрашенных изделий. Но принцип общий: капли при переходе в аэрозольное состояние приобретают заряд и аэрозольные частицы движутся в одном направлении — только к обрабатываемой поверхности, имеющей заряд, противоположный по знаку заряду частиц. В результате лакокрас-

сочные материалы расходуются более экономно и, кроме того, предотвращается загрязнение воздуха. К тому же заряженные капли обеспечивают прочную адгезию, т. е. прилипание препарата к поверхности изделия, так что срок эксплуатации образующихся покрытий удлиняется.

Способность заряженных аэрозольных частиц двигаться в заданном направлении позволяет препарату попасть точно в цель. А цели могут быть самыми различными, в том числе и растения. Заряженные частички пестицидов электрическим полем направляются только к растению, но... масштабы применения пестицидных препаратов столь огромны, а погодные и другие условия столь разнообразны, что возникают определенные трудности при реализации электроосаждения аэрозольных частиц в открытой атмосфере.

Другое дело — в помещениях. «Объектом» электроаэрозольной обработки могут быть даже... цыплята. При аэрозольной вакцинации цыплят расход получившего электрический заряд препарата сокращается от 2 до 6 раз по сравнению с вакцинацией незаряженным аэрозодем.

Особенно трудно при аэрозольной обработке помещений покрасить потолок. В этом можно убедиться, наблюдая за аэрозольной побелкой потолка: значительная часть препарата осаждается там, где он не нужен. Электрическое поле позволяет обойтись без такого расточительства. При дезинфекции железнодорожных вагонов, например, потолки обрабатывают при помощи заряженных аэрозольных препаратов.

Мы уже говорили о «причастности» аэрозолей к копчению рыбы и мясных изделий. В этом процессе, как и в других, значительная часть аэрозолей используется не по назначению. Для повышения эффективности прибегают к помощи электрического поля. В процессе электрокопчения подавляющее большинство мелких капель попадает в цель.

Возьмем другую отрасль — производство посуды, керамики, искусственных материалов, которых нет в природе. Направленное движение заряженных аэрозольных частиц в электрическом поле позволяет осуществить глазирование керамических изделий, эмалирование посуды и ряд других процессов. Электроосаждение аэрозольных частиц с одновременной

ориентацией их называют электроворсованием. Процесс основан на свойствах частиц неправильной или удлиненной формы располагаться вдоль силовых линий электрического поля. В электрическом поле заостренные концы частиц ориентируются в сторону более высокой напряженности этого поля, а более округленные — в сторону поверхности.

Под действием электрического поля происходит одновременная ориентация частиц в строго определенном порядке. Электрическое поле позволяет сохранить этот порядок и осадить частицы на поверхности, являющейся основой будущего материала. В результате из волокнистых (волокна хлопка, шерсти, вискозы и др.), ворсистых и абразивных частиц формируются на бумажной, тканевой и иной основе определенно ориентированные плотные слои; они-то и образуют лицевую сторону создаваемого искусственного материала. Таким способом получают ковры, искусственную замшу и бархат, бархатистую бумагу, обои и другие декоративные материалы. Основой могут служить также металлы, полимеры, древесина и др.

Рассмотрим в качестве примера некоторые процессы, в которых на аэрозоли воздействует электрическое поле, например электроформование и электрические методы обогащения. Казалось бы, какое отношение к аэрозолям имеют всем известные керамические плитки. Для получения добротного материала необходимо иметь формовочный порошок, частицы которого были бы примерно одного и того же размера. Для этого порошки переводят в аэрозольное состояние, и под действием электрического поля происходит их сепарация, т. е. разделение на фракции, что дает возможность выделить порошок, необходимый для дальнейшей обработки.

Известно, что для добычи полезных ископаемых нужно освободиться от пустой породы. Этот процесс называется обогащением. Различные по природе и размерам аэрозольные частицы под действием электрического поля заряжаются по-разному и движутся в различных направлениях. Их можно уловить избирательно. Тем самым создается возможность разделить исходный продукт на несколько составляющих. Электрическое обогащение, в отличие от флотации, не

требует больших масс воды, более экономично и экологически целесообразно.

### **РАСПЫЛЯЯ, СУШИМ**

Перевод препарата в аэрозольное состояние — необходимое условие осуществления некоторых процессов, к числу которых принадлежит распылительная сушка. Попробуй высушить увлажненную муку или какой-либо другой сыпучий продукт: на содержимое небольшого пакета потребуется не один час. Другое дело — аэрозоль: для его сушки понадобится всего несколько секунд. Материал распыляют, т. е. переводят в аэрозольное состояние. Как и в любых аэрозолях, в этом случае резко увеличивается поверхность раздела фаз. Так, при распылении одного литра молока на частицы диаметром 40 мкм поверхность продукта достигает 300 м<sup>2</sup>. Увеличение поверхности позволяет резко сократить продолжительность сушки: время пребывания материала в сушильном аппарате составляет от 5 до 30 секунд. Варьируя время сушки, температуру и размеры аэрозольных частиц, можно получить продукт (например, сухое молоко) требуемого качества.

Распылению можно подвергнуть и истинные, и коллоидные растворы, суспензии, эмульсии, порошки, т. е. практически все продукты и препараты, которые могут быть переведены в аэрозольное состояние, а именно: молоко, яйца, фруктовые соки, кормовые дрожжи, витамины, кровь и кровезаменители, мыла, синтетические моющие средства, томатные продукты. Эта универсальность делает распылительную сушку широко распространенным технологическим процессом.

При сушке продукт может менять свое агрегатное состояние — из жидкости превратиться в порошок, удобный для транспортировки и готовый к употреблению. Так получают молочные и яичные порошки, порошки для напитков и соков, детского питания и др.

Для сохранения вкусовых качеств многих пищевых продуктов, в том числе и ягод, применяют сублимационную сушку. Обработанная подобным образом клубника, например, продолжительное время — вплоть до самой зимы — сохраняет свой аромат, напоминая нам

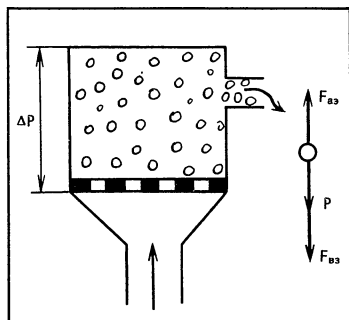
о солнечном лете. Сначала продукт, подлежащий сублимационной сушке, замораживают. Это дает возможность за счет сублимации удалить из него все лишнее, например влагу, переводя ее из твердого состояния в газообразное. Иногда сублимационную сушку проводят ради извлечения из продукта необходимых жидких веществ. Во всех случаях сублимационная сушка позволяет отделить одно вещество от другого, улучшить качество продукта и тем самым использовать его наиболее полно.

При обычном давлении процесс сублимационной сушки очень длителен. Чтобы его ускорить, в промышленности используют вакуумные установки. Вакуум в содружестве с холодом позволяет быстро заморозить продукт и осуществить сублимацию замороженного продукта. Еще в большей степени ускоряется процесс сушки, когда препарат переводят в аэрозольное состояние. Таким образом подвергают сушке молоко, закваски, кисломолочные продукты. Сублимационную сушку используют в биологической, медицинской и других отраслях промышленности.

### В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Познакомимся еще с одним явлением, которое связано с переводом частиц во взвешенное состояние, а именно с псевдооживлением. Псевдооживление — процесс, обратный оседанию частиц, когда из осадка частицы под действием газового потока переходят во взвешенное состояние. В отличие от распылительной сушки псевдооживление применимо к довольно крупным частицам. Некоторые из них, например зерна злаков, во взвешенном состоянии нельзя назвать аэрозолями.

Псевдооживление связано с прохождением воздуха через слой частиц и возникновением аэродинамической силы  $F_{аз}$ , которая способна преодолеть вес частиц  $P$  и силу взаимодействия между частицами  $F_{вз}$ . Если воздух движется с небольшой скоростью, то он всего лишь фильтруется через пустоты между частицами, которые остаются неподвижными. С увеличением скорости воздушного потока слой частиц разрыхляется. При дальнейшем увеличении скорости



частицы переходят во взвешенное состояние и образуется высококонцентрированная аэрозольная система.

Скорость воздуха не должна быть слишком большой. В противном случае мелкие частицы будут выброшены из кипящего слоя и произойдет неоправданная потеря препарата. В зависимости от свойств сыпучего материала, его количества и внешних условий скорость псевдооживления колеблется от десятых долей до десятков сантиметров в секунду (см/с).

Псевдооживленный слой может быть однородным, когда концентрация частиц в нем примерно постоянна. Однако в некоторых случаях, при неодинаковом дисперсном составе и неравномерной подаче воздуха, могут образовываться пустоты, своеобразные пузыри в псевдооживленном слое.

Воздушный (газовый) псевдооживленный слой очень похож на бурлящую жидкость: верхняя его поверхность горизонтальна, он может перетекать из сосуда в сосуд и истекать из отверстия, перепад давления ( $\Delta P$ ) пропорционален массе слоя между двумя сечениями, при соединении двух слоев по типу сообщающихся сосудов их уровни выравниваются.

За способность взвешенных в воздушном потоке частиц течь подобно жидкости весь процесс и получил название псевдооживления. Этот процесс коллективный, когда одновременно все частицы примерно одного и того же размера переходят в аэрозольное состояние, а сопротивление потоку газа преодолевает вес всего слоя частиц. Примером своеобразного грандиозного псевдооживления является образование аэрозолей при извержении вулканов, о чем речь пойдет ниже.

Не только при помощи воздушного потока можно осуществить псевдоожижение. Вспомним спортивный снаряд батут: упругие силы натянутой сетки как пушинку подбрасывают прыгуна в воздух. Таким же образом могут «подбрасывать» в воздух частицы сыпучих материалов вибрирующие части аппаратов (поддоны, выпускные воронки бункеров и др.). Взвешенное состояние частиц в псевдоожиженном слое характеризуется амплитудой и частотой колебаний.

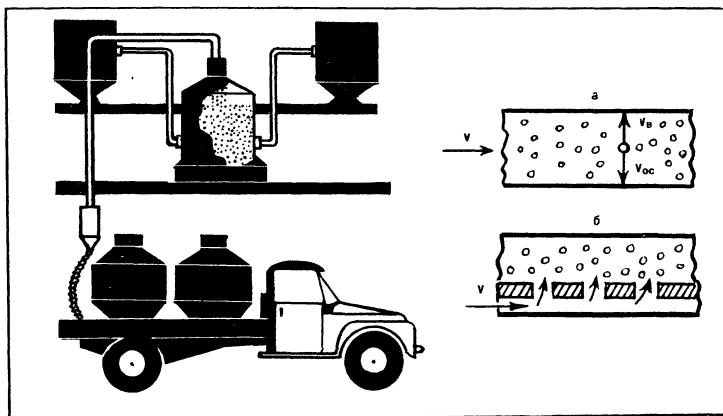
На практике применяют комбинированные способы псевдоожижения. Чтобы снизить расход воздуха (для создания необходимой скорости псевдоожижения требуются энергоемкие аппараты), на помощь воздушному потоку приходят вибрация и электрическое поле. Получив одноименный с электродом заряд, частицы отталкиваются от него и друг от друга — а это и есть переход в псевдоожиженное состояние.

Во взвешенном состоянии, что характерно для псевдоожижения и распылительной сушки, поверхность частиц оголяется, т. е. освобождается от соседства с другими частицами и становится доступной для газовой среды. Тем самым ускоряются поверхностные химические реакции, испарение и другие поверхностные явления. В кипящем слое частицы интенсивно перемешиваются. Они нагреваются равномерно и одинаково; при повышенной температуре происходит удаление влаги со всей поверхности частиц. Одновременное и равномерное испарение ускоряет процесс и способствует сохранности продуктов, в частности пищевых. В таком состоянии можно сушить зерно, семена, сахарный песок и другие сыпучие продукты. Время сушки определяется скоростью воздушного потока и его температурой. Естественно, при более высокой температуре сушка происходит быстрее.

Для ускорения химических реакций применяют катализаторы, часто в виде порошка. Для того чтобы в каталитическом процессе участвовала вся поверхность частиц, прибегают к псевдоожижению.

Представим себе, что некоторое количество песка необходимо пропустить через трубу. Если этот песок полностью заполняет трубу, то для его течения потребуются невероятные усилия. Передвижению частиц мешает «теснота» — слишком близкое соседство





Два варианта пневмотранспорта

других частиц. Если эту помеху убрать, т. е. перевести частицы в аэрозольное состояние, то они поплывут беспрепятственно. Перемещение частиц под действием воздушного потока в аэрозольном состоянии называют пневматическим, а использование подобного перемещения для промышленных целей — пневмотранспортом. Суть пневмотранспорта и псевдооживления одна и та же — преодоление под действием воздушного потока взаимодействий между частицами и перевод их во взвешенное состояние. Отличие же в том, что в процессе пневмотранспорта частицы перемещаются на довольно значительное расстояние, а не «кипят».

Для полета волейбольного мяча или шарика для настольного тенниса надо сообщить им некоторую начальную скорость. Если эта скорость будет незначительной, то мяч или шарик упадут на землю. При чрезмерной скорости они вылетят за пределы площадки. Нечто подобное имеет место с сыпучими материалами. При переводе их в аэрозольное состояние необходимо сообщить всей массе частиц такую скорость  $v$ , которая позволила бы им находиться во взвешенном состоянии и предотвратила оседание. Напомним, что аэрозольные частицы могут оседать с определенной скоростью  $v_{oc}$ .

Как уже отмечалось ранее, под действием вертикальной составляющей воздушного потока  $v_v$  возникает вертикальная компонента аэродинамической си-

лы ( $F_{\text{аз}}$ )<sub>в</sub>. Если аэродинамическая сила преодолевает вес частиц  $P$  и силу взаимодействия между ними  $F_{\text{вз}}$ , то контакт между частицами нарушается и они переходят в аэрозольное состояние. Во взвешенное состояние можно перевести довольно крупные частицы, например зёрна, т. е. верхняя граница размеров аэрозольных частиц весьма условна. Известны формулы, с помощью которых можно подобрать оптимальную скорость воздуха для осуществления псевдооживления и пневмотранспорта.

Пневмотранспорт позволяет механизировать погрузку и разгрузку сыпучих материалов; при этом значительно повышается производительность труда, снижаются потери. Эти и другие преимущества, однако, все же не исключают его недостатков; важнейший из них — повышенное потребление электроэнергии, что связано с большим расходом воздуха.

Расход воздуха и его скорость при пневмотранспорте зависят также от расположения трубопровода. При его вертикальном расположении, когда направление скорости потока и движения частиц совпадают, расход воздуха минимальный. В горизонтальном трубопроводе взвешенная в потоке воздуха частица перемещается под воздействием вертикальной компоненты скорости, которая составляет заметную долю от горизонтальной скорости потока. Поэтому расход воздуха в горизонтальном потоке в 3—4 раза больше по сравнению с вертикальным потоком.

Для облегчения движения частиц горизонтально расположенные трубопроводы пневмотранспортных установок делают с небольшим наклоном в сторону движения (угол наклона составляет около  $5^\circ$ ). В одном из вариантов пневмотранспорта подача и движение воздуха и сыпучего материала совмещены (рисунок *а* на с. 134). Более экономичен вариант, в котором подача воздуха обособлена (рисунок *б*); в этом варианте сочетаются принципы псевдооживления и пневмотранспорта. Воздух через отверстия перегородки, отделяющей воздуховод от сыпучего материала, переводит этот материал в псевдооживленное состояние, а движение продукта происходит под действием воздуха и самотеком за счет наклона желоба, который расположен под углом  $4\text{—}8^\circ$  к горизонту.

В технической литературе часто применяют термин «газовзвеси»; это поток газа, в котором взвешены твердые частицы или капли жидкости. По существу это тоже пневмотранспорт, но с несколько меньшей концентрацией аэрозольных частиц. Газовзвеси широко применяются в химической, нефтехимической, металлургической и других отраслях промышленности.

Принципы псевдооживления и пневмотранспорта, основанные на переводе частиц в аэрозольное состояние, используют в порошковой металлургии. При некоторой довольно значительной скорости воздушного потока часть частиц начинает покидать кипящий слой. Варьируя скорость воздуха, можно разделить порошкообразные материалы на фракции по размерам частиц.

Прерывистый воздушный поток в состоянии измельчать некоторые материалы, переводить образующиеся частицы в аэрозольное состояние и одновременно отделять раздробленную массу от оставшейся сплошной. Подача определенной порции частиц в виде аэрозолей в состоянии пневмотранспорта позволяет дозировать порошки, а сведение двух различных аэрозольных потоков в одни — смешивать порошки для получения необходимых композиций.

Итак, джинн, как мы видим, действительно великий труженик.

### **КОНТРАСТ ЯРКОСТИ**

Один из видов маскировки, который широко применяется в военном деле, основан на использовании маскирующих дымов. Маскирующие дымы позволяют создать дымовые завесы, т. е. искусственные аэрозольные облака.

В военном деле все искусственно создаваемые аэрозоли называют дымовыми завесами, а исходное вещество — дымообразующим, независимо от условий создания и свойств дисперсной фазы аэрозолей, которые на самом деле могут быть или туманом, или дымом, или пеной.

Представим себе густой туман, который в городах средних широт нашей страны довольно редкое, но не исключительное явление. Как уже упоминалось, во время октябрьских туманов 1987 года небо над

большей частью европейской территории страны, в том числе над Москвой и ее окрестностями, в течение семи дней было затянуто сплошной пеленой тумана. Видимость порой достигала всего 100 метров. Подобная аномалия не отмечалась за весь 107-летний период метеорологических наблюдений. В тумане все предметы становятся расплывчатыми, плохо видимыми или невидимыми совсем. То же самое имеет место, когда дымовое облако образуется искусственно. В условиях дымовой завесы, которая создается во время боевых действий, можно совершить скрытое передвижение войск, готовиться к наступлению, идти в атаку — одним словом, маскировать действия и расположение своих войск.

Дымовая завеса, направленная в сторону противника, лишает его возможности вести прицельный огонь, даже при использовании современных средств наведения на цель.

Автор этих строк в октябре 1944 года участвовал в создании дымовой завесы при форсировании реки Нарев, притока Вислы. Эта дымовая завеса никого не прикрывала и не ослепляла, а имела целью ввести противника в заблуждение. Фактически форсирование реки происходило не на том участке, где была поставлена дымовая завеса, а в другом месте. Участок, где она создавалась, находился в стороне от главного удара, а дымовая завеса имитировала активные действия войск.

Прикрытие переправ через Волгу у Сталинграда и при форсировании Днепра, задымление Кронштадта и Севастополя, широкое применение дымовых завес в Берлинской операции — это далеко не полный перечень активного использования дымовых завес в Великой Отечественной войне.

Дымовые завесы могут быть использованы и в других целях. Стало модным во время эстрадного представления окутывать сцену плавающими облаками; не будем тут обсуждать, всегда ли это уместно, но иногда весьма впечатляет. Вы можете дома воспроизвести такой стелющийся туман, бросив кусочек «сухого льда» в чашку или тарелку с горячей водой. Туманы, дымки, облака пыли и другие подобные эффекты кинематограф успешно воспроизводит при помощи искусственно создаваемых дымовых завес.

Маскирующая способность дымовых завес основана на использовании оптических свойств аэрозолей. Для того чтобы различать предметы, необходим источник света и детектор, принимающий и преобразующий энергию источника. Источником может быть световая энергия в различных видах (солнце, лампа накаливания и др.) или любой объект, рассеивающий свет от других источников,— здания, деревья, а также аэрозоли. Помимо глаза детектором может служить и прибор (фотометр, фотоэлектронный умножитель). Наличие источника и детектора — это необходимое, но не достаточное условие. Между предметом и окружающим фоном должен существовать контраст яркости, иначе детектор не в состоянии отличить предмет от фона. Всякий предмет рассматривается не обособленно, а на фоне других (или другого) предметов. Поэтому яркость предмета принимается по отношению к яркости другого предмета и является контрастной. Черные буквы на фоне белой бумаги видны отчетливо, а белые буквы на этой же бумаге различить невозможно. Звезды на небе в безоблачную погоду видны только ночью.

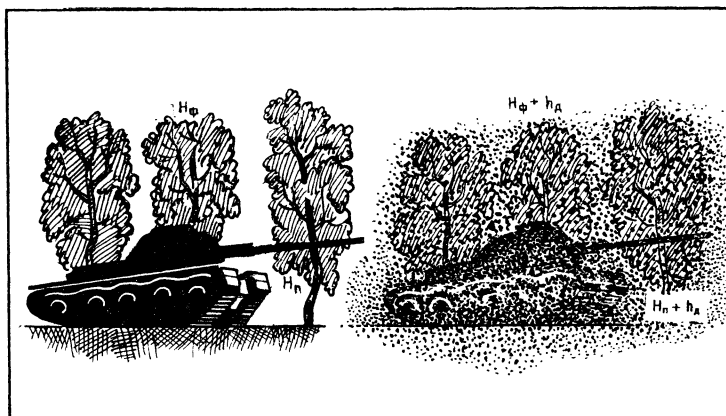
Защитный цвет обмундирования и соответствующая окраска вооружения способствуют снижению их яркости на фоне местности и затрудняют обнаружение. Для снижения контрастной яркости в зимних условиях используют белые маскировочные халаты, а образцы вооружения окрашивают в белый цвет.

Контрастом яркости называют разность между яркостью предмета  $H_{\text{п}}$  и фона  $H_{\text{ф}}$ , отнесенную к яркости фона, т. е.  $(H_{\text{п}} - H_{\text{ф}})/H_{\text{ф}}$ .

Величина, равная 0,02 (2%), принимается за порог чувствительности человеческого глаза. На принципе снижения контраста яркости до порога чувствительности и основано маскирующее действие дымовых завес.

Аэрозоли искусственных дымов и туманов, образующие маскирующую дымовую завесу, поглощают и рассеивают свет. Вследствие рассеяния света дымовое облако само становится источником света. К яркости предмета и фона добавляется яркость дымового облака  $h_{\text{д}}$ , находящегося между предметом и наблюдателем.

Если до создания дымовой завесы контраст ярко-



Аэрозоли в роли шапки-невидимки

сти определялся яркостью предмета  $H_n$  и фона  $H_\phi$ , то после формирования дымового облака яркость фона и предмета увеличивается на величину  $h_d$ . В дымовом облаке за счет увеличения яркости фона на величину  $h_d$  происходит снижение контраста яркости и быстрое достижение порога чувствительности, когда предметы в аэрозольном облаке становятся невидимыми. Одновременно снижается интенсивность света, который рассеивается предметом и фоном, и понижается их яркость. Предметы становятся белесоватыми, а разница в цвете предмета и фона будет менее ощутимой. Естественно, что маскирующие свойства дымовых завес зависят от размеров, свойств и концентрации аэрозольных частиц. Все эти рассуждения в полной мере относятся ко всем другим излучениям, используемым для наблюдения и прицеливания, в том числе к инфракрасным и радиолокационным.

### ЭКОНОМИЯ НА ДЫМЕ

Процесс образования маскирующих дымовых завес и облаков один и тот же — возникновение пересыщенных концентраций пара и его последующая конденсация в капли тумана и десублимация в твердые частицы дыма. Если в облаках пересыщение

создается за счет естественных атмосферных процессов, то при постановке дымовых завес оно вызывается искусственно путем поступления дымообразующего вещества в воздух.

Простейшим дымообразующим веществом является масло. При испарении и последующей конденсации высококипящих (с температурой кипения выше 300 °С) нефтяных масел образуется масляный туман. Получается белое облако с хорошими маскирующими свойствами. Использование масляных аэрозолей связано с большим расходом препарата, а с учетом потерь масса дисперсной фазы аэрозольного облака будет меньше массы исходного дымообразующего вещества.

Для повышения массы искусственно создаваемого аэрозольного облака, а следовательно, и для снижения расхода дымообразующих веществ можно использовать резерв, который находится в воздухе. К такому резерву относятся пары воды.

Дымовые завесы создаются при помощи дымообразующих веществ; одним из первых был использован белый фосфор. При дроблении его на воздухе одновременно идут два процесса: горение твердого продукта и испарение не успевшего сгореть фосфора с последующим воспламенением, но уже в воздушной среде. При горении образуются оксиды фосфора, в основном пентоксид  $P_2O_5$ , в виде пересыщенного пара, который частично конденсируется и одновременно вступает в реакцию с парами воды воздуха, образуя фосфорные кислоты (также в виде паров). Дымовая завеса при использовании белого фосфора состоит из частичек оксидов и капель кислот фосфора (и оксиды, и кислоты гигроскопичны).

Масса аэрозольных частиц помимо дымообразующего вещества (фосфора) вбирает кислород и влагу воздуха, увеличиваясь тем самым по крайней мере в пять раз по отношению к массе исходного вещества, что позволяет получать дымовую завесу, экономя на дымообразующем веществе. Джинн, освободившийся из плена, увеличивает свою массу.

Дымообразующим веществом может служить олеум — раствор триоксида серы ( $SO_3$ ) в концентрированной серной кислоте. При распылении на воздухе триоксид серы испаряется; его пары взаимодействуют

с парами воды воздуха, образуя капли тумана, содержащего разбавленный раствор серной кислоты. Масса капель за счет паров воды значительно (более десяти раз) превышает массу исходного дымообразующего вещества. В данном случае маскирующие действия обеспечиваются именно взвешенными в воздухе каплями, т. е. туманом, а не дымом. При использовании олеума в процессе постановки дымовых завес на его основе приходится применять дополнительные меры по технике безопасности, поскольку исходный продукт представляет собой сильную и высококонцентрированную кислоту.

В военном деле для постановки дымовых завес используют дымовые шашки и дымовые гранаты, начиненные твердой дымовой смесью. Дымовая шашка массой немного более 2 кг может создать в воздухе при благоприятных условиях дымовое облако, объем которого исчисляется несколькими сотнями кубических метров. Как и в предыдущих случаях, при использовании белого фосфора и олеума, дымообразующие средства помогают экономить влагу воздуха.

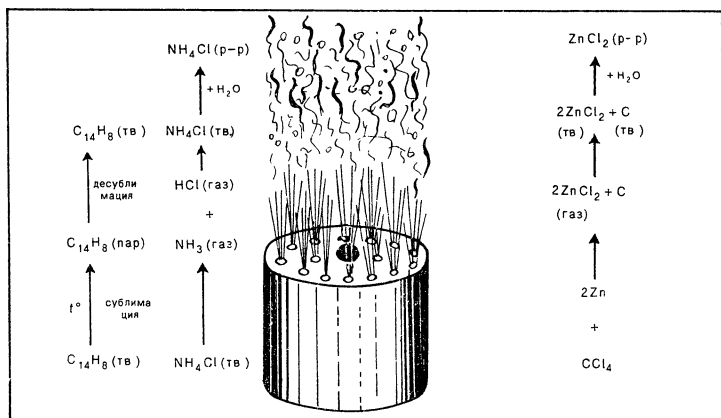
Рассмотрим, как осуществляется принцип подобной экономии на примере так называемых антраценовых дымовых смесей. Эти смеси содержат несколько компонентов, в том числе антрацен  $C_{14}H_{10}$  (отсюда название этих смесей), нафталин  $C_{10}H_8$  \* и хлорид аммония  $NH_4Cl$ . Шашки приводятся в действие специальным запальным устройством, которое поджигает дымовую смесь. Антрацен сгорает с выделением тепла, за счет которого происходит сублимация нафталина, т. е. переход его из твердого состояния в газообразное. Дымовое облако оказывается пересыщенным парами нафталина, которые в свою очередь десублимируются и превращаются в твердые частички дыма.

Высокая температура способствует распаду (диссоциации) хлорида аммония на аммиак  $NH_3$  и хлороводород  $HCl$ , которые в холодном воздухе соединяются (ассоциируют), образуя исходное вещество. Одновременно вновь образованные частицы хлорида аммония поглощают влагу воздуха. В целом процесс

---

\* Антрацен и нафталин — кристаллические органические вещества с температурой плавления соответственно 80 и 213 °С.





Дымообразование в шашках антраценовых (слева) и металлохлоридных (справа)

дымообразования при снаряжении шашек антраценовой смесью можно представить так, как это показано на рисунке слева. Некоторая часть нафталина выгорает, превращаясь в сажу, которая придает дымовому облаку серый цвет.

Помимо антраценовых применяются еще и металлохлоридные дымовые смеси. Их основными компонентами являются цинковая пыль и четыреххлористый углерод  $CCl_4$  или гексахлорэтан  $C_2Cl_6$ . При воспламенении цинковая пыль бурно реагирует с хлорсодержащим веществом, причем образуются сажа и пары хлорида цинка, которые затем в холодном воздухе конденсируются. Процесс дымообразования представлен на рисунке схемой справа.

Пары хлорида цинка в холодной атмосфере воздуха после конденсации взаимодействуют с парами воды и образуют капли, в которых растворен  $ZnCl_2$ . Процесс дымообразования в металлохлоридных шашках основан на химической конденсации паров образующегося вещества ( $ZnCl_2$ ) — пересыщение возникает после химической реакции. Аэрозоли состоят из частиц и капель, а выделяющийся в виде сажи углерод окрашивает их в серый цвет.

Если в состав дымообразующей смеси ввести достаточно устойчивые красители, то можно получить цветные дымы, широко применяемые для сигнализации. Обычно такие дымы состоят из негигроскопиче-

ских частиц, а масса образующегося дыма равна и может быть даже меньше массы исходного дымообразующего вещества. Поскольку сигнальные дымы имеют ограниченное применение, вопрос об экономии дымообразующего вещества в этом случае не возникает.

### **ПРОТИВ РАКЕТ И САМОЛЕТОВ; НОЧНЫЕ НЕВИДИМКИ**

Могут ли пылинки вступать в единоборство с ракетами? Оказывается, аэрозоли способны «обманывать» ракеты и самолеты, меняя направление их полета и отвлекая от истинной цели.

Во время второй мировой войны при отражении налетов авиации на город Гамбург операторы немецких радиолокационных станций обнаружили на экранах индикаторов неожиданные помехи, которые делали невозможным распознавание сигналов от приближающихся самолетов. Помехи как радиолокационные отражатели были вызваны лентами из алюминиевой фольги. Длина этих лент не превышала 5 см — половины длины волн, на которых работали радиолокационные станции. Толщина лент соответствовала размеру дисперсных систем — около 5 мкм, т. е. ленты можно рассматривать как своеобразные аэрозольные системы, дисперсность которых определяется только одним размером — толщиной. При налетах на Германию было сброшено примерно 20 000 тонн алюминиевой фольги. Если радиолокаторы используют дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны, то отражательной способностью обладают капли грозовых туч и дождя, размер которых не превышает половины длины рабочей волны станций.

Аэрозоли широко используются для создания искусственных маскирующих помех в качестве радиолокационных отражателей. Своеобразие подобных аэрозолей в том, что их создают из металлизированных бумажных лент, фольги или металлизированных стеклянных и капроновых волокон.

Толщина металлического покрытия таких аэрозольных частиц составляет единицы микрометров, а диаметр самих волокон — десятки и сотни микрометров. Частицы распыляются при помощи бомб или автоматов, образуя облако. Компактность и время

действия облака определяется седиментационной устойчивостью такой аэрозольной системы, скоростью ветра и турбулентностью атмосферы. В результате хаотического перемещения положение аэрозольных частиц внутри облака изменяется случайным образом. Аэрозольных частиц много и в совокупности они дают необходимый эффект.

Помимо лент и волокон против радиолокационного обнаружения объектов применяют твердые аэрозольные пены, о которых речь шла в начале книги. Основа твердых пен образуется после распыления в токе горячих газов и полимеризации ряда материалов. На внешнюю ячеистую структуру наносят металл. Частицы дисперсной фазы таких аэрозолей имеют диаметр 1—100 мкм и обладают небольшой массой. Это придает аэрозольной системе седиментационную устойчивость, а металлизированная внешняя поверхность обладает повышенной способностью радиолокационного отражения. Таким образом, аэрозоли стали неотъемлемой частью в создании помех для работы радиолокационных станций.

В военно-морском флоте аэрозоли для противолокационной защиты создают с помощью водяных завес, которые одновременно предохраняют корабль от опасности оседания радиоактивных веществ. В данном случае водяные аэрозоли противодействуют радиоактивным аэрозолям (джинн против джинна). Насосы под давлением разбрызгивают воду, которая в виде спадающего аэрозольного дождевого зонта прикрывает корабль. Величина отражающего сигнала радиолокационных станций от водяной завесы снижается в  $10^3$ — $10^5$  раз.

Было обнаружено, что аэрозольные частицы, осаждаясь на какой-либо поверхности, не теряют своей способности отражать радиоволны, что было использовано при разработке противолокационных покрытий. Одна из модификаций таких покрытий состоит из волокон диаметром до 10 мкм, покрытых тонким слоем алюминия, меди, железа и некоторыми другими металлами. Кстати, по этому принципу работают противолокационные покрытия самолетов-невидимок «Стелс», которые широко использовались во время военных действий в Персидском заливе в начале 1991 года.

Новые качества приобретают дымовые завесы, которые создают в ночное время. Ночью и так темно — зачем же тогда нужны дымовые завесы? Оказывается, дымовые завесы в ночное время нейтрализуют действие приборов ночного видения и средств искусственного освещения. Для постановки подобных дымовых завес дисперсная фаза аэрозолей формируется из различных пенообразующих веществ на основе полимеров. Капли полимерного материала впрыскиваются в горячий газовый поток, приобретают ячеистую структуру и, попадая в воздух, остывают; при этом образуется твердая аэрозольная пена. Незначительная плотность дисперсной фазы аэрозолей из твердых пен позволяет частицам витать в воздухе, повышая эффективность и время существования дымовой завесы.

Изыскиваются новые дымообразующие вещества, которые способны снизить эффективность применения современных систем оружия, оснащенных оптически, инфракрасными и радиолокационными устройствами наведения на цель. К таким дымообразующим веществам относятся полимеры в сочетании с красителями.

К числу новых дымообразующих композиций следует отнести ранее применявшийся белый фосфор, который армируется хлопчатобумажной тканью. Такая композиция применяется в виде порошка, после распыления которого существенно увеличивается время жизни дыма от нескольких десятков секунд до пяти минут.

Дымовые завесы рассеивают лазерные лучи, которые в военном деле используются для локации, самонаведения снарядов и ракет, наведения орудий, разведки и связи. Изменяя условия наведения, аэрозольные облака заставляют ракеты летать мимо цели. Образование аэрозолей в форсажных двигателях самолетов и ракет происходит в плазме выхлопных газов. Подобная система (аэрозоли — плазма) способна ослабить энергию лазерного луча, что затрудняет направленную атаку ракет с лазерной системой наведения.

Световое излучение ядерного взрыва является одним из поражающих факторов ядерного оружия, действующих на больших расстояниях. Дымовая заве-

са снижает поражающее действие светового излучения по крайней мере в 10 раз. Дымовые завесы в этих случаях должны быть продолжительными, поэтому для их создания предполагается использовать дымовые машины. Дымообразующим веществом в таких машинах служат различные масла, о которых говорилось ранее.

Разработан и другой тип машин. Дымообразующим веществом является раствор триоксида серы в хлорсульфоновой кислоте. Это вещество ядовито не менее, чем олеум. Поэтому, чтобы обезопасить работу с ним, его заключают в ампулы, которые вскрывают только перед постановкой дымовых завес.

Итак аэрозоли успешно применяются в военном деле. Джинн выступает в качестве средства противодействия новым видам оружия. Однако всегда надо помнить, что абсолютной защиты от современного оружия нет, и в ядерной войне не будет победителя. Поэтому надо ориентироваться лишь на мирные «профессии» джинна.

## **ДЖИНН НА СВОБОДЕ**

### **В ТРУБУ**

Еще двадцать лет тому назад природные ресурсы казались неисчерпаемыми, а дымовые трубы считались символами прогресса; но по мере того как изводились леса, начали исчезать реки, загрязняться водоемы и стало буквально нечем дышать, на передний план, отодвинув декорации одностороннего технического прогресса, выступили экологические проблемы. Одна из самых главных — загрязнение атмосферного воздуха. Общий выброс вредных веществ в атмосферу на территории нашей страны за 1985—1990 годы составлял, по самым скромным подсчетам, 65 миллионов тонн ежегодно. Кроме того, автотранспорт «дарит» атмосфере еще 40 миллионов тонн выбросов. Небольшим утешением, если только это можно считать утешением, может послужить то обстоятельство, что в США суммарный выброс в атмосферу различных загрязнений не намного меньше, чем у нас.

Если бы кто-то вдруг стал сваливать бытовые отходы не в мусоропровод, а в коридор себе или соседу, иначе как дикость это не расценишь. Между тем многочисленные выбросы в атмосферу, которая окружает Землю и является жизненно необходимой средой, стали настолько привычными, что их даже не замечают. Через трубы различных размеров и форм в атмосферу, как в помойную яму, выбрасываются отходы: сажа, остатки топлив, оксиды серы и углерода — всего не перечесать, а вместе с ними и более ценные продукты (металлы, нефтепродукты, редкоземельные элементы и многое другое). На ветер иногда летит буквально золото. В США, при всей американской расчетливости, за год с аэрозолями улетучиваются десятки миллиардов долларов.

Попробуем разобраться в том, кто и что выбрасывает в атмосферу. Источниками выброса пылевых частиц являются заводы по производству цемента, железобетона, асбеста, кирпича, извести, оксидов магния, теплоизоляционных материалов — этот перечень может быть продолжен. Короче, строительные, металлургические, химические предприятия, тепловые станции, многочисленные котельни — вот далеко не все «авторы» индустрии загрязнения. Если все вокруг покрыто красно-коричневой пылью — значит, недалеко кирпичный завод. Визитной карточкой цементных заводов является серый налет на зданиях, строениях, зеленых насаждениях. Действительно, при производстве 22—25 миллионов тонн цемента в атмосферу может поступать 78 тысяч тонн цементной пыли, что составляет примерно 3% от производительности цементных заводов. Невысокие трубы асфальтовых заводов извергают черный дым, содержащий множество сажевых частиц.

Предприятия черной металлургии поставляют в атмосферу твердые частицы, содержащие соединения железа, марганца, ванадия и несгоревшего топлива. Особенно опасно доменное производство, в котором на тонну продукта образуется от 20 до 60 кг аэрозолей. При плавке одного миллиона тонн чугуна и стали в год металлургический завод ежесуточно выбрасывает 100 тонн диоксида серы (сернистого ангидрида  $\text{SO}_2$ ). Еще больше этого продукта поступает в атмосферу от тепловых электростанций, особенно

использующих серосодержащие угли. Кстати, на долю диоксида серы приходится почти треть всех промышленных выбросов в атмосферу.

Да простит меня читатель за, может быть, излишнее увлечение цифрами. Они делают более наглядной экологическую опасность со стороны аэрозолей, которая угрожает 104 городам нашей страны. Конечно, это уже не первый удар в набат. Тем не менее в последнее время город Братск, например, превращается из города-легенды в город повышенной опасности. К существующим «кочегаркам» прибавились цех кристаллического кремния и алюминиевый завод — производства с весьма неэффективными способами очистки отходящих газов.

Не отстают от металлургических и машиностроительные заводы, которые выбрасывают в атмосферный воздух оксид углерода, пылевые частицы, диоксид серы, пары органических растворителей, свободный диоксид кремния, соединения свинца, цинка и других металлов.

Многоцветный букет выбросов поставляют в атмосферу предприятия химической промышленности. Воздух загрязняется диоксидом серы, сажей, оксидами азота, аммиаком, бензолом, ацетоном, соединениями цинка и хрома, фторсодержащими и многими другими соединениями, из которых могут образовываться разнообразные токсичные аэрозоли.

Принятые в нашей стране способы переработки нефти сопровождаются потерей за счет выбросов 0,5% продукта; на первый взгляд полпроцента — это совсем немного, но для завода, перерабатывающего в год 12 миллионов тонн нефти, это означает выброс в атмосферу 60 тысяч тонн. Вскрышные, строительные, мелиоративные и другие работы сопровождаются образованием громадного количества грунтовых аэрозолей. Среди транспортных средств «рекорд» по выбросам принадлежит автомобилю. Автомобильные выхлопные газы задерживаются в приземном слое воздуха, которым мы дышим, что делает их особо опасными для людей. Наибольшей вред приносят свинец и оксид углерода (угарный газ CO).

Современные высокооборотные экономичные бензиновые двигатели нуждаются в таком бензине, который равномерно сгорает при высокой степени

сжигания. Для улучшения горения к бензинам добавля-  
ют небольшое количество тетраэтилсвинца. В резуль-  
тате выхлопные газы автомобилей ежегодно поставля-  
ют в воздух более 200 тысяч тонн свинца. Начиная  
с 20-х годов вездесущий автомобиль принес в земную  
атмосферу более 5 миллионов тонн свинцовых аэро-  
золей. В организм человека или животных часть  
свинца попадает через органы дыхания, большая же  
его часть — та, что оседает на почву, — поглощается  
растениями, а затем через пищу и корма поступает  
в организм. С отработавшими газами в воздух  
выбрасывается сажа, которая образует довольно  
устойчивую аэрозольную систему. Основным постав-  
щиком сажи являются автомобили с дизельными  
двигателями.

Аэрозоли образуются во время перевозки в откры-  
тых вагонах сыпучих материалов, например угля.  
Воздушный поток, который возникает при движении  
железнодорожных составов, способен выдувать верх-  
ний слой. Потери могут быть огромными. Если не  
предпринимать специальных мер, то движущийся  
железнодорожный состав может в виде шлейфа пыли  
тащить за собой до тонны аэрозолей в расчете на  
один полувагон.

Безграничная свобода джинна равносильна анар-  
хии. Источников загрязнения атмосферы аэрозолями  
больше чем достаточно. И все же среди этого  
множества можно выделить несколько главных, с ко-  
торыми связывается наибольший вред для всего  
живого на нашей планете.

Представим условно основные загрязнения воздуха  
в виде трех групп. К первой по масштабам следует  
отнести оксиды азота и серы, более 200 тысяч тонн  
которых ежегодно поступают в атмосферу. Они-то  
и формируют атмосферные аэрозольные слои, рас-  
смотренные ранее (см. стр. 65). Вторую по количеству  
выбросов группу составляют твердые минеральные  
частицы различной природы и размеров. Некоторые  
из них представляют непосредственную опасность для  
человека при попадании в органы дыхания. Выбросы  
тяжелых металлов (свинца, кадмия и особенно ртути),  
которые образуются при сжигании ископаемых топ-  
лив, поступают в атмосферу главным образом в виде  
частиц диаметром в несколько микрометров. Наконец,



третья основная группа загрязнений формируется из органических веществ: нефти и нефтепродуктов, выбросов органических производств, в том числе полимерных.

Систематически направленный сбор, анализ и оценка данных, характеризующих атмосферные процессы (так называемый климатический мониторинг), в том числе и относительно атмосферных аэрозолей, ведется с 1978 года в рамках Всемирной климатической программы. Участниками этой программы являются большинство стран Мира, в том числе и наша. Только объединив усилия, можно рассчитывать на успешное решение этой глобальной проблемы.

### **МИМО РТА**

Вернемся еще раз к проблеме использования пестицидов, которую, как уже отмечалось, следует рассматривать как две стороны медали. Подошла очередь взглянуть на оборотную — теневую сторону этой проблемы. Что вы скажите о проголодавшемся человеке, который второпях проносит ложку мимо рта, так что большая часть желанной еды оказывается на полу? Нечто подобное происходит при обработке полей пестицидами в аэрозольном состоянии, когда эффективно используются едва ли 10—20% препарата. При опрыскивании полей с самолета, летящего на предельно низкой высоте, даже при слабом боковом ветре (например, 2,5 м/с) капли диаметром 100—200 мкм сносятся на 100 и более метров от курса самолета, а капли диаметром менее 50 мкм — на километры. «Пища» растений не только теряется бесполезно, но и может принести вред.

Снос пестицидных аэрозольных препаратов ветром — одна из самых сложных проблем защиты растений. Результаты теоретических и экспериментальных работ здесь зачастую противоречивы. Это объясняется тем, что на потерю препаратов влияет множество факторов, и в том числе испарение. При авиационной обработке, когда капли препарата некоторое время находятся в воздухе, испарение жидкости особенно ощутимо. При температуре 15 °С и 40%-ной относительной влажности воздуха время жизни одиночных капель воды диаметром 50 мкм составляет

всего четыре секунды, а для частиц размером 100 мкм — 16 секунд. Капля, имеющая диаметр после распыления 100 мкм, начинает падать со скоростью 0,3 м/с и за 16 секунд пролетит всего 4,8 метра, т. е. при распылении из самолета эта капля не долетит до земли. Фактически время жизни множества капель больше, чем одиночных в связи с насыщенностью атмосферы парами воды. Но тем не менее испарение капель значительно. По этой причине, а также для лучшего закрепления капель на листьях растений в воду добавляют загустители и ПАВ, кроме того, применяют в качестве растворителей пестицидных препаратов плохо испаряющиеся жидкости, в частности масла (вазелиновое, трансформаторное и др.).

Все же основные потери, особенно пылевидных препаратов, происходят за счет сноса частиц и непопадания в цель. Зачастую препараты попадают мимо цели, когда нарушается технология их применения. Такое непопадание в цель вовсе не безобидно. Так, рисовые поля после обработки пропанилом с самолета дали солидную прибавку урожая — до 10 центнеров с гектара; но в 32 км от этого поля погиб сливовый сад: сливы пострадали от гербицида, капли которого диаметром менее 60 мкм были занесены с ветром.

Загрязнению атмосферы и окружающей среды способствует миграция препаратов и их длительное последствие. Пестициды могут попасть в воздух вместе с почвенной пылью под воздействием ветра, а также при обработке почвы и уборке урожая. Пестицидные загрязнители циркулируют в биосфере подобно атмосферным аэрозолям и сохраняют биологическую активность до своего полного распада. Основную опасность представляют остаточные количества ядохимикатов в растениях.

В августе 1985 года более 100 тысяч тонн помидоров, выращенных в окрестностях Неаполя, пришлось уничтожить, так как они оказались непригодными для еды после обработки пестицидом «темик»; этот пестицид выпускает фирма «Юнион карбайд», повинная в массовом отравлении людей в индийском городе Бхопал в 1985 году. В 60-годах под Парижем погибло до 200 тысяч пчелиных семей из-за

того, что сурепку — медонос, с которого пчелы берут взятки, систематически обрабатывали ядохимикатами.

Отрицательные последствия применения пестицидов порой трудно предвидеть. Еще совсем недавно был очень популярен дешевый пестицид ДДТ, ныне запрещенный к применению. Спыхватились, когда он был обнаружен в женском молоке. ДДТ причастен к гибели лысых орлов, о которых мы уже говорили. Оказалось, что этот препарат, попадая в организм самки лысого орла, причем даже в небольших количествах, отрицательно сказывается на прочности яичной скорлупы. Насиживаемые яйца не выдерживают материнской массы и преждевременно лопаются. Кстати, в США приняты специальные меры для сохранения этих птиц, символизирующих мощь государства.

В пойменных землях Нечерноземья еще недавно обитали до 300 земляных червей на 1 м<sup>2</sup>. «Стараниями» пестицидов их численность сократилась в десятки и сотни раз, а это сказалось на биологической ценности почвы и в первую очередь на ее плодородии. Биологическая активность почв, кроме того, снижается из-за уничтожения травяного покрова, сама же почва становится беззащитной перед напором ветра и воды.

Огромные потери пестицидных препаратов, возможные пагубные последствия побудили изыскивать более рациональные способы их применения. Таких способов несколько. Можно использовать препараты, имеющие после распыливания капли одного и того же размера, т. е. монодисперсные или близкие к ним аэрозоли. В этих условиях легче попасть в цель, а снос препарата будет минимальным. Разработано несколько вариантов так называемого малообъемного опрыскивания, при котором расход препарата ограничен пределами 0,1—6 литров на гектар. Экономии способствует распыление препаратов мотодельтапланами, которые по сравнению с самолетами могут летать на более низкой высоте, так что попадание становится более точным.

Какие бы ухищрения ни предпринимались, они, повышая КПД использования пестицидных препаратов, в конечном счете все же не могут исключить потерь препарата и загрязнения окружающей среды.

Поэтому нельзя применять пестициды без глубокого и всестороннего анализа возможных отрицательных экологических последствий, без учета метеорологических условий, специфики местности и особенностей самих аэрозолей. Применяемые пестициды должны обладать избирательным действием, т. е. не оказывать отрицательного воздействия на другие объекты и подвергаться разложению с образованием нетоксичных продуктов в течение одного вегетационного периода.

Природу не обманешь. Не спасают порой ни ультрамалые дозы применяемых препаратов, ни их быстрый распад. У сотен видов насекомых возникли популяции, устойчивые к ядам. В одной из африканских республик для борьбы с мухой цеце пойменные леса были обработаны дельтаметрином и перметрином в очень малых количествах — всего один грамм на гектар. Результат: исчезли одиннадцать из 55 видов пресноводных рыб, а муха цеце осталась.

Земля уже устала от обилия химических потрав; их надо резко сокращать. Прослеживаются новые пути, к числу которых относится биологический метод защиты растений. Суть его в следующем: против непрошенных нахлебников, поражающих растения, необходимо бороться при помощи уничтожающих их насекомых.

Стало очевидным, что эффективная борьба с вредителями растений не должна нарушать безопасность природы. Такую борьбу можно вести успешно путем разумного сочетания химических, биологических и агротехнических методов.

### **КИСЛОТНЫЕ ДОЖДИ**

Научно-технический прогресс вызвал бурное развитие химической промышленности. Первыми жертвами химии в середине 50-х годов стали рыболовы Норвегии, когда резко сократился улов рыбы в озерах этой страны. Виновными в снижении добычи рыбы оказались не норвежские предприятия, а «подарок», преподносимый циклонами. Эти циклоны зарождаются в Атлантике и проходят Британские острова и Северную Европу, где они вбирают кислые выбросы промышленных предприятий европейских стран. Эти выбросы затем попадают на территорию Норвегии

в виде кислотных дождей. Причем ежегодно дожди приносят до 50 тысяч тонн серы (что эквивалентно примерно 150 тысячам тонн концентрированной серной кислоты), по крайней мере половина которой «импортного» происхождения.

Что же такое кислотные дожди и чем они отличаются от обычных осадков? Для ответа на этот вопрос необходимо вспомнить некоторые основные положения химии. Из курса средней школы вам известно, что кислотность водных растворов обусловлена наличием в них свободных ионов водорода  $H^+$ . Вода диссоциирует на ионы  $H^+$  и  $OH^-$ , но степень диссоциации ее незначительна и при 20 °C концентрация ионов водорода в химически чистой воде составляет всего  $10^{-7}$  моль/л. Отрицательный десятичный логарифм концентрации водородных ионов принято обозначать символом pH, т. е. pH химически чистой воды равен 7. При  $pH < 7$  раствор будет кислотным, а когда  $pH > 7$ , то раствор становится щелочным.

Незагрязненная дождевая вода в момент образования при конденсации водяного пара нейтральна, и показатель, характеризующий ее кислотность (pH), равен 7. Даже в самом чистом воздухе имеется углекислый газ. Растворяя его, дождевая вода несколько подкисляется; pH воды, насыщенной  $CO_2$ , не превышает 5,5, но это еще не кислотный дождь.

Вообще говоря, кислотными можно считать дожди, которые имеют pH ниже 5,5. В Европе и Северной Америке pH дождевой воды зачастую меньше 4,5. Такой дождь уже обладает свойствами разбавленной кислоты и может вступать в химические реакции.

В северо-восточной части промышленных штатов Новой Англии (США) pH дождевой воды составляет уже 3—4. (Следует еще раз обратить внимание на то, что шкала pH логарифмическая. Поэтому снижение значения pH на одну единицу означает рост кислотности в 10 раз.) Своеобразный рекорд по кислотным дождям поставил шотландский город Питлохри, где 10 апреля 1974 года выпал дождь с  $pH = 2,4$ , т. е. нечто вроде столового уксуса.

Как же образуются кислотные дожди? Они вызваны присутствием в атмосфере оксидов серы и азота, источниками которых являются газы, образующиеся

при сгорании любого топлива. Стремление к удешевлению производств приводит к необходимости сжигать низкосортные угли и мазуты, которые превращаются в мощный источник выбросов, богатых оксидами серы.

Диоксид серы  $\text{SO}_2$  окисляется кислородом воздуха до  $\text{SO}_3$ , который взаимодействуя с парами воды, образует серную кислоту. В дальнейшем в условиях насыщения и пересыщения паров серной кислоты возникают мелкие капли, т. е. туман.

Триоксид серы  $\text{SO}_3$  образуется не только в газовой среде, но и в каплях аэрозолей. При этом серная кислота может частично или полностью нейтрализоваться щелочным агентом, например, находящимся в атмосфере аммиаком. Процесс окисления  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$  идет во времени. Примерно через двое суток с момента попадания в атмосферу оксидов серы капли кислотного дождя будут содержать серную кислоту.

Второй по значимости компонент кислотных дождей связан с нахождением в атмосфере оксидов азота —  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ . Последний, соединяясь с влагой воздуха, дает азотную кислоту. Максимальное содержание азотной кислоты в атмосфере достигается примерно через 10 часов, т. е. меньше чем за половину суток после выбросов формируются капли азотно-кислого дождя.

Кислотными дожди становятся в основном благодаря оксидам серы и азота, но в промышленных выбросах содержится и много других веществ, обладающих кислотными свойствами. Образующиеся кислоты, а затем соли кислот, нередко еще более токсичные, чем исходные оксиды, могут находиться в атмосфере значительное время. Поэтому кислотные дожди способны выпадать за многие сотни и тысячи километров от источника первичного выброса. Потоки диоксида серы пересекают любые границы, особенно интенсивно — территории Европы и Северной Америки. Так, от соседей в общей сложности мы ежегодно получаем 5—10 млн. тонн  $\text{SO}_2$ , но и к ним от нас поступает не меньше.

Возникнув из выбросов на территории США, кислотные дожди оказывают губительное действие в соседней Канаде. Не избежали кислотного загрязнения территории и водоемы США.

Кислотные дожди вредят в первую очередь водоемам, но не только им. Ведь содержащиеся в дождях кислоты — активные химические реагенты. Происходит закисление природной среды на обширной территории Европы и Северной Америки. Из почвы вымываются различные соединения, в том числе тяжелых металлов, что резко снижает ее агрохимическую ценность. Около миллиона гектаров лесов центральной Европы поражены кислотными дождями, не избежали этой участи деревья кавказского заповедника. Кислотные дожди вызывают коррозию металлов и разрушение различных сооружений, в том числе и памятников старины. В Волгограде стал жертвой кислотных дождей и получил серьезные повреждения известный памятник «Родина-мать» на Мамаевом кургане.

Перевод экологически грязных видов производств из США в другие страны, в том числе в Африку и Латинскую Америку, привел к тому, что эти регионы тоже стали испытывать на себе губительное действие кислотных дождей. Некогда мощные вековые деревья вокруг бразильского города Кубатан превратились в труху вследствие того, что десятки промышленных предприятий отравляют воздух оксидами серы. В Мексико изъедены камни архитектурных памятников доколумбовой и колониальной эпох. В Чили вокруг городка Вентапас, где действуют крупные предприятия по переработке сульфидной медной руды, в радиусе 20 км простирается зона пустынь. Причина всех этих нестихийных бедствий одна — кислотные дожди.

Запретные меры, направленные на снижение выбросов серы и азота вблизи промышленных предприятий, привели к тому, что при помощи труб-гигантов выбросы стали производиться на большой высоте от земли. В этих условиях выбросы попадают уже к соседям. В США трубы ниже 200 метров не строят. Самая высокая труба достигает 400 метров, она построена на медно-никелевом комбинате в канадском городе Садбери. Ясно, что исполинские трубы — не выход из создавшегося положения. Это еще один пример порочного принципа выбрасывать мусор в коридор соседа.

В 1979 году по инициативе СССР европейские государства, США и Канада подписали конвенцию,

предусматривающую уменьшение распространения загрязняющих веществ на большие расстояния.

Кислотные дожди не признают границ. Эта проблема перестала быть заботой отдельных государств. Активная борьба с отрицательными последствиями кислотных дождей требует больших капиталовложений и объединения усилий многих стран в практической реализации международного сотрудничества.

### **ПОСЛЕДНИЙ ДЕНЬ ПОМПЕИ**

Так называется картина известного художника К. П. Брюллова, в которой отражена трагедия Помпеи, некогда прекрасного города. В 63 году н. э. этот античный город, расположенный у юго-восточного склона кратера вулкана Везувий, испытал небывалой силы землетрясение. Через 16 лет после землетрясения в результате извержения Везувия город оказался засыпанным 7—9-метровым слоем вулканической породы и пепла. Раскопки, которые начались в 1860 году, открыли сохранившиеся под пеплом остатки города.

За 4,5 миллиарда лет геологической истории Земли из ее недр было вынесено примерно  $15 \cdot 10^{18}$  тонн вулканических продуктов. Эти цифры близки к массе земной коры всех континентов, вместе взятых. (Под земной корой континентов подразумевается пространство суши на глубине 35—45 км.)

Вулкан можно себе представить в виде гигантской бутылки, из горлышка которой извергается джинн в виде огня, газов и твердых выбросов. (Вулкан у древних римлян — бог огня и кузнечного дела; огнедышащие горы ассоциировались с кузницами гигантов и богов.)

Вулканические газы состоят из водяных паров, водорода, аммиака, серы, углеводородов, оксидов углерода, соединений серы и галогенов, причем масса газовых выбросов составляет всего несколько процентов от массы всех выбросов. Значительная часть газовых и твердых вулканических выбросов превращается в аэрозоли. Состав, свойства и масса вулканических аэрозолей специфичны и определяются особенностями конкретного вулкана. В то же время аэрозоли многочисленных вулканов обязательно со-



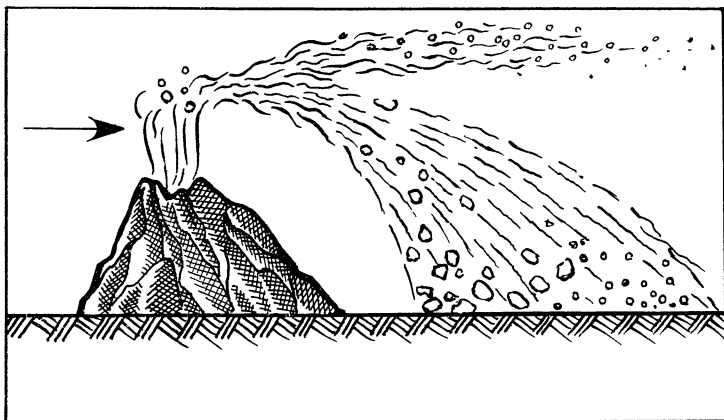
держат два основных компонента. Один из них — капли концентрированного раствора серной кислоты, образующейся в результате окисления диоксида серы. Огромные выбросы диоксида серы наблюдались, в частности, во время извержения вулкана Эль-Чичон (Мексика); капли серной кислоты в условиях этого извержения имели размеры от 0,2 до 0,5 мкм. Второй обязательный компонент вулканических аэрозолей состоит из частиц своеобразной твердой пены. Из кратера вулкана извергаются газы и лава, происходит вспенивание и разбрызгивание породы. В результате образуются частицы пепла, внутренние полости которых заполнены газом. Частицы пепла, являющиеся аэрозольной пеной, содержат вулканическое стекло и некоторые другие горные породы (например, кристаллический плагиоклаз, магнетит).

Масса пепла огромна. При извержении вулкана Тятя, которое началось 14 июля 1973 года на острове Кунашир (Курильские острова) и продолжалось две недели, было выброшено в воздух 20 миллионов тонн (!) пепла. Извержение вулкана на острове Святой Елены в мае 1980 года привело к исчезновению верхней части горы (объемом примерно 3 км<sup>3</sup>); она перешла в аэрозольное состояние.

Как происходит образование аэрозолей вулканического происхождения? Температура извергаемого материала в момент извержения до 1000 °С, а давление газа в центре кратера вулкана достигает сотен атмосфер. На периферии оно быстро падает до атмосферного. В результате перепада давлений извергаемый вулканом материал в значительной степени вспенивается и распыляется, а его частицы приобретают большую скорость и быстро остывают.

Гигантское аэрозольное облако поднимается на сравнительно большую высоту; при извержении вулкана Тятя она составляла 5—8 км. Возможен подъем аэрозольного облака еще выше, а некоторое количество мелких частиц пепла вместе с газами способны достигнуть верхних слоев стратосферы и слоя Юнга (18—20 км), о котором речь шла ранее.

Заметим попутно, что мельчайшая пыль вулканического происхождения, главным образом на основе оксидов серы, способна распространиться на высоту 50—80 км. Она остается там месяцы и даже годы.



Гигантское псевдоожигение

Подобное долголетие объясняется тем, что из верхних слоев атмосферы аэрозоли не вымываются осадками.

Вулканическое облако распространяется на большое расстояние, оставляя за собой след в виде осевших частиц. Сначала из него выпадают довольно крупные частицы. Так, на расстоянии 5 км от центра вулкана Тятя на земной поверхности обнаружены частицы, диаметр которых порой составлял 250—500 мкм. В дальнейшем по пути движения вулканического облака оседают более мелкие частицы. Площадь следа из осевших частиц после извержения вулкана Тятя составляла 20 тысяч км<sup>2</sup>; для сравнения — площадь Бельгии равна 30,5 тысяч км<sup>2</sup>.

Проследим образование и судьбу аэрозолей вулканического происхождения одного из крупнейших извержений вулкана Эль-Чичон, которое произошло 28 марта 1982 года. За 10 суток вулканической активности было выброшено 300 млн тонн пепла, т. е. в 15 раз больше, чем при извержении вулкана Тятя. Толщина слоя пепла на расстоянии до 75 км от вулкана достигала 20 см. Образовалось огромное аэрозольное облако, по следу которого происходило выпадение пепла и локальное повышение температуры воздуха на 5 градусов.

При движении первичного облака, которое возникло непосредственно после извержения вулкана, произошла естественная сепарация за счет оседания более

крупных частиц и образовалось сравнительно устойчивое вторичное облако. Масса этого облака составляла примерно 5% от всех выбросов. Вторичное облако совершило полный оборот вокруг Земли за 21 сутки со средней скоростью 22 м/с. Облако находилось преимущественно на высоте 18 км. Анализ проб аэрозолей показал, что в облаке преобладают силикатные частицы диаметром менее 2 мкм. Доля частиц, образованных серной кислотой, составляла примерно 20%. К началу осени облако стало распространяться в более высокие широты и только к апрелю 1983 года, т. е. через 18 месяцев после извержения вулкана, прекратило свое существование.

Стратосферные аэрозоли, образующиеся при извержении вулканов, задерживают прямую и рассеянную солнечную радиацию и, следовательно, влияют на температуру воздуха и климат. В результате вулканических извержений с 1980 по 1982 год активность солнечной радиации к лету 1982 года понизилась примерно на 2,1%, а температура северного полушария весной, летом и осенью упала на 0,07—0,18 °C. Зимой атмосферные аэрозоли вулканического происхождения способствуют повышению температуры воздуха; это повышение составляет около одного градуса. Приведенные данные по изменению средней температуры воздуха под действием вулканических аэрозолей являются все же ориентировочными.

Климатические эффекты от извержения вулканов вызваны не только аэрозольным пеплом, но и каплями серной кислоты. Заметим, что за последние 30 лет к вулканическим присоединились новые источники тропосферных сернокислотных аэрозолей в виде выбросов промышленных предприятий. Фактически, сернокислотные аэрозоли различного происхождения образуют в атмосфере единые слои.

Таким образом, вулканы являются мощными генераторами аэрозолей, причем значительная часть их находится в атмосфере длительное время и способна перемещаться вокруг Земли.

Частицы пепла вулканического происхождения имеют пористую структуру и поэтому обладают колоссальной поверхностью. Суммарная поверхность пепла, образованного при извержениях в 1975—1976 гг. вулкана Толбачик (Камчатка), почти в 2 раза превышает площадь, занимаемую Украиной. Огромная поверхность аэрозольных частиц способствует возникновению ряда явлений в вулканическом облаке, к числу которых относятся электризация и повышенная химическая активность.

Взаимное трение и столкновение пепловых частиц при извержении приводит к их электризации. Заряд частиц может превышать предельные значения, что в свою очередь вызывает электрические разряды и молнии. Длина молний достигает километров, а их ширина — десятков сантиметров. Общее число электрических разрядов в вулканическом облаке измеряется миллионами. При извержении вулкана Тятя в аэрозольном облаке при разряде молний в течение десятитысячных долей секунды развивалась температура до 10—30 тысяч градусов. В момент разряда большинство элементов переходило в ионизованное состояние, что служит одним из мощных импульсов для химических процессов.

Пепло-газовые вулканические тучи — это по существу многокилометровые мощные химические реакторы. В них есть все необходимые газовые компоненты для синтеза сложных органических соединений. Перепад температур внутри вулканического облака составляет от 1000 °С до температуры окружающей среды, а давления — от 100 до 1 атм. Частицы пепла — это минеральные катализаторы, а многочисленные электрические разряды создают условия, которые могут служить для синтеза органических соединений. Извержения вулканов Тятя и Толбачик тому подтверждение. Анализ проб после извержения этих вулканов показал наличие органических соединений, в том числе аминокислот, нуклеотидов и сложных углеводов — важнейших компонентов белков, основы всего живого. Кроме того, обнаружено большое число гетероатомных соединений и углеводородов, включая и насыщенные.

Огонь, молнии в сочетании с высокой температурой и каталитическим действием сообщают аэрозольному джину признаки жизни. Биологическая гипотеза возникновения жизни на Земле приобрела в последнее время еще и биовулканическое направление, в котором аэрозолям в виде пепла отводится роль катализатора газовых реакций.

Вулканизм играет определенную роль в формировании звезд, планет и других космических тел. Вулканизм на Луне миллиарды лет назад был очень интенсивным. Анализ снимков лунного кратера Альфонс подтвердил, что он сформирован из потоков вулканической лавы.

Вулканический рельеф Марса неоднороден. В северном полушарии преобладает равнина с отдельными крупными кратерами. В южном полушарии кратеров больше и они напоминают гористые районы Луны. Лавовые потоки марсианского вулкана Алла-Патер зафиксированы на снимках, которые получены с автоматической станции «Маринер-9».

Полет «Маринера-10» дал большой фотографический материал, который позволяет утверждать о наличии вулканов на Меркурии. С 1961 года запущено 14 станций «Венера» и совершено шесть мягких посадок на ее поверхность. Полеты станций «Венера», космических аппаратов «Маринер-10» в 1973—1975 годах и «Пионер — Венера» позволили получить некоторые сведения о вулканах Венеры. При небольшой скорости ветра, равной 1 м/с, продукты извержения вулканов планеты не попадают в атмосферу, а выпадают непосредственно вблизи кратеров. Грунт Венеры в большей своей части представляет модифицированный вулканический пепел.

Специфика вулканизма и извержение вулканов зависят от размеров и массы планет, свойств и состава их атмосферы и определяют подъем вулканических аэрозолей, их распространение и оседание.

Таким образом, вулканы планет извергали большое количество аэрозолей. Какова же их судьба? Еще в 30-х годах для объяснения существования кометных систем и планет была выдвинута гипотеза извержения, согласно которой происхождение малых тел Солнечной системы — комет, астероидов и метеоритов — связывают с продуктами извержения вулканов.

В последнее время эта гипотеза получила подтверждение. Станция «Вояджер-2» с 20 апреля по 10 августа 1970 года облетела с разных сторон все 12 юпитерианских спутников, которые всегда обращены к Юпитеру одной стороной, и произвела полный обзор их поверхности. В разных точках одного из спутников, Ио, было обнаружено семь вулканических шлейфов. Это первый случай, когда была зафиксирована внеземная вулканическая активность. Высота выброса аэрозолей вуканами Ио оценивалась в несколько сот километров, а скорость выбросов составляла 1 км/с. Высказано предположение, что кольца вокруг Юпитера образованы аэрозолями вулканического происхождения.

Таким образом, вулканы и аэрозоли вулканического происхождения характерны и для Земли, и для внеземных небесных тел. Не служит ли это еще одним подтверждением единства Вселенной?

### **КОЛОКОЛЬНЫЙ ЗВОН И НАБАТ**

После Чернобыльской катастрофы всем стало очевидно, насколько опасны и коварны аэрозоли, несущие радионуклиды (радиоактивные изотопы). С зарождением атомной промышленности и энергетики джинн приобрел такие качества, которых не могли и вообразить древние арабские сказители. Еще 50 лет тому назад о радиоактивных аэрозолях имел представление лишь узкий круг специалистов.

Если Чернобыль — набат, эхо которого разнеслось по всей планете, то до этой трагедии неоднократно раздавался колокольный звон, оповещавший о выбросах радиоактивных аэрозолей. Аварийные выбросы — не единственный источник радиоактивных аэрозолей, они могут образовываться в процессе получения ядерного горючего, при эксплуатации ядерных энергетических установок, в том числе на подвижных объектах (ледоколах, подводных лодках и даже космических аппаратах).

С того времени как началась работа по созданию ядерных реакторов (с 1944 года), зафиксированы сотни малых и больших аварийных выбросов, приведших к образованию радиоактивных аэрозолей. У каждого колокольного звона были свои особенности; не имея

возможности оценить их, остановимся на самых значительных.

Первая крупная авария, которая коснулась населения, произошла 8 октября 1957 года в Уиндскейле (Англия). Во время отжига графита часть уранового топлива раскалилась, возник пожар. Продукты радиоактивного распада в виде аэрозолей и газообразный иод были выброшены в атмосферу. Адсорбируясь на атмосферных аэрозольных частицах, иод-131 превратил их в радиоактивные. Образовавшееся радиоактивное облако достигло Австрии и Норвегии.

На дне реактора по сей день лежит 1700 тонн частично сгоревшего и расплавившегося топлива, а 32 кКи (килоюри) было выброшено в атмосферу. Насколько велики последствия этих выбросов, поможет оценить следующее сопоставление: опасное загрязнение одного литра молока — это 1 мКи (миллиюри), т. е. в 30 миллионов раз ниже.

Последствия этой крупной катастрофы тщательно скрывались, и только по истечении 30-летнего срока стали известны некоторые подробности. Подобной тайной была окружена крупная авария на Южном Урале в 1957 году, вызванная взрывом в хранилище с высокоактивными отходами атомного производства. По опубликованным позже сообщениям, в атмосферу вырвалось около 20 МКи (мегакюри), причем более 10% пришлось на радиоактивное аэрозольное облако высотой до 1 км. По пути движения этого облака радиоактивные частицы, оседая, загрязняли территории в Челябинской, Свердловской и Тюменской областях общей площадью в 15 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет примерно половину территории Бельгии.

28 марта 1979 года на атомной электростанции в Тримайл-Айленд (США) произошла авария; 10 из 100 тонн расщепляющегося материала попали за пределы станции. К счастью, большая часть этого материала перешла в теплоноситель (в воду), а в атмосферу — два выброса благородных газов (ксенона и криптона) и радионуклидов иода. Эта авария по своим последствиям несоизмерима с Чернобыльской; между тем после аварии в США была проведена быстрая эвакуация населения из опасной зоны, а причины и последствия этой аварии подверглись публичному анализу.

Сведения об авариях спутников с ядерными источниками энергии публикуются довольно скупо. Еще в 1964 году зафиксирована подобная авария американского спутника, в результате которой произошло глобальное выпадение плутония-238 в виде аэрозолей, 70% которых рассеялись в южном полушарии.

Вернемся к Чернобыльскому набату. Четвертый блок превратился в гигантский вулкан, непрерывно извергавший в течение десяти дней смертоносный пепел, который распространялся на огромной территории. Направление ветра за первые пять суток изменилось на 360 градусов, описав полный круг. Подобного временного выброса радиоактивных аэрозолей и территориального масштаба радиоактивного загрязнения человечество еще не знало.

Аэрозольные выбросы радиоактивных веществ определили катастрофические последствия Чернобыльской аварии. По официальным данным в воздух попало 50 МКи радионуклидов, что составило примерно 3,5% массы ядерного горючего реактора. Именно эти выбросы вызвали загрязнение огромной территории и водоемов (масштабы подобного загрязнения приведены на рисунке), потребовали эвакуации сотен тысяч человек, вызвали лучевую болезнь у тысяч людей с непредсказуемыми еще отдаленными последствиями и предопределили колоссальный объем работ по удалению радиоактивных загрязнений (одного радиоактивного грунта перевезено свыше двух миллионов кубометров, для чего потребовалось 200 тысяч рейсов 10-тонных самосвалов). Чернобыльский набат возвестил о национальной трагедии.

По характеру и интенсивности выбросов радиоактивных веществ в Чернобыле можно разграничить три периода. Первый из них определялся взрывом и разрушением реактора с последующими пожарами и характеризовался интенсивным (до 25%) выбросом в атмосферу радиоактивных веществ в первые сутки аварии. Во втором периоде, который длился 9 дней, горение графита привело к резкому подъему температуры (до 2500 °С) и неравномерному выносу продуктов деления ядерного горючего. Чрево аварийного реактора поглощало доставляемые вертолетами различные нейтрализующие и фильтрующие материалы (свинец, глина, песок и др.).





Район загрязнения после оседания радиоактивных аэрозолей (по состоянию на 10 июня 1986 года)

На изолиниях показана мощность дозы 0,05 миллирентген/час. Рисунок, полученный с помощью самолетных гамма-съепок, заимствован из статьи Ю. А. Израэля с соавторами, опубликованной в журнале «Метеорология и гидрология» (1987, № 2, с 5—18)

Третий период продолжался после погашения массовых выбросов до строительства укрытия («саркофага»); он характеризовался локальными источниками выхода радиоактивных продуктов в атмосферу, которые пробивали себе дорогу через толщу защитного слоя и в процессе возведения укрытия.

Радиоактивные аэрозоли Чернобыля уникальны по механизму образования, физико-химическим свойствам (размеры, растворимость, летучесть и др.) и радионуклидному составу. Значительная часть радиоактивных аэрозолей, особенно в первый и в начале второго периода, образовывалась за счет диспергирования ядерного топлива. Размер аэрозольных частиц в основном превышал 10 мкм, а плотность была более чем в 10 раз выше плотности воды, поэтому такие тяжелые частицы быстро оседали и образовали опасную 30-километровую зону радиоактивного загрязнения вокруг реактора.

Во второй период, и частично в первый, радиоактивные аэрозоли образовывались в результате конденсации паров радионуклидов и сорбции продуктов деления на атмосферных аэрозолях. Возникшие конденсационным путем радиоактивные высокодисперсные аэрозоли имели небольшие размеры и распространялись глобально. Уже в 6 часов утра 28 апреля 1986 года (а авария произошла в 1 час 26 мин 26 апреля) радиоактивные аэрозоли обнаружили

в Швеции, затем в Финляндии и практически во всех странах Европы, а также в Японии, Китае, Гренландии, США и других странах. Радиоактивные аэрозоли в состоянии примерно за 10—14 дней обогнуть земной шар. Это действительно тревожный набат для всего человечества.

Радиоактивный аэрозольный джинн Чернобыля не ограничился тем, что вырвался из реактора. Огромная загрязненная территория превратилась в своеобразный источник последующего образования радиоактивных аэрозолей. В сухую погоду при движении транспорта, порывах ветра и по другим причинам, в частности при запуске и посадке вертолетов, переводились в воздух тонны пыли, содержавшей радиоактивные вещества. Эта радиоактивная пыль вновь распространялась и загрязняла все на своем пути, в том числе и те объекты, которые ранее подверглись очистке от радиоактивных веществ.

В аэрозольных выбросах Чернобыля выявлено 27 различных радионуклидов. Первоначально после аварии угрозой представляли короткоживущие изотопы благородных газов (криптона и ксенона), а также йод-131, обладающий большой активностью и способный накапливаться в организме; к 1992 году наибольшую опасность представляли уже долгоживущие радионуклиды стронция и цезия, особенно цезия-137.

И сейчас звучит погребальный звон чернобыльского набата. Эхо чернобыльского набата еще десятилетия будет напоминать о катастрофе и ее последствиях, заставляя с высокой ответственностью подходить к проблемам безопасности в атомной энергетике.

### **НЕТ ВАЖНЕЕ ЗАДАЧИ**

Понятие «радиоактивные аэрозоли» возникло задолго до чернобыльской катастрофы и связано с появлением в 1945 году ядерного оружия. После взрыва материалы, из которых состоит атомная бомба, испаряются. По мере охлаждения пары конденсируются и десублимируются в твердые радиоактивные частицы, образующие высокодисперсную фазу радиоактивных аэрозолей. Они возникают при взрыве на значительной высоте. Например, в городах Хиросиме

и Нагасаки атомные бомбы с тротиловым эквивалентом около 20 килотонн были взорваны на высоте примерно 555 метров. Такие взрывы называют воздушными — частицы грунта, поднятые с поверхности земли, не достигают огненного шара. Образующиеся при воздушных взрывах седиментационно устойчивые высокодисперсные аэрозоли распространяются глобально. Они оседают через значительное время после взрыва и формируют так называемые поздние выпадения.

При наземном (надводном) взрыве радиоактивных аэрозолей образуется значительно больше, чем при воздушном взрыве. Масса грунта (воды) вовлекается в огненный шар, расплавляется и испаряется в нем. Продукты деления и другие радиоактивные материалы при конденсации осаждаются на частицах грунта, которые превращаются в радиоактивные аэрозоли.

Образующееся грибовидное аэрозольное радиоактивное облако за 10 минут после взрыва достигает максимальной высоты и может проникнуть в тропосферу на высоту примерно от 7,5 до 16,5 км в зависимости от времени года и географической широты. В дальнейшем высокодисперсные частицы этого облака способны подняться и на большую высоту. При наземных взрывах ядерных боеприпасов общей мощностью  $10^4$  мегатонн в атмосферу было выброшено  $10^7$ — $10^8$  тонн радиоактивной пыли, что примерно эквивалентно запыленности стратосферы после мощнейшего извержения вулкана Кракатау в 1883 году.

Радиоактивное облако сносится ветром, и по пути движения в результате оседания радиоактивных частиц образуется радиоактивный след. Количество и характер выпадения радиоактивных продуктов могут изменяться в широких пределах. После термоядерного взрыва мощностью 15 мегатонн, осуществленного США 1 марта 1954 года на атолле Бикини, радиоактивному загрязнению подверглась огромная площадь, а зараженный район имел форму сигары и простирался в направлении ветра более чем на 500 км, причем максимальная ширина достигала 100 км. Формирование радиоактивного следа закончилось примерно через 24 часа после взрыва.

Оседанию радиоактивных частиц способствуют

осадки, особенно дожди. Капли дождя захватывают эти частицы и вместе с ними оседают на землю. Один джинн (капли дождя) загоняет в бутылку (возвращает на землю) другого джинна (радиоактивные осадки). Происходит самоочищение атмосферы от радиоактивных загрязнений, но... на землю обрушиваются радиоактивные дожди. Такие дожди, несущие радиоактивный «подарок», нередко наблюдались в период массовых испытаний ядерного оружия (до 1961 года) в местах, удаленных от ядерных полигонов на сотни километров. Радиоактивные аэрозоли достигли даже Африки и Австралии, где ядерные испытания не проводились.

Из сказанного не следует, что опасность представляют только средне- и грубодисперсные, способные оседать, седиментационно неустойчивые радиоактивные аэрозоли. Высокодисперсные аэрозоли воздушными потоками распространяются по всей планете и они не менее опасны, чем аэрозоли наземных взрывов. Высокодисперсные частицы удерживаются в стратосфере от нескольких месяцев до нескольких лет, т. е. в течение времени, когда они наиболее активны. Расчеты показывают, что выпадение радиоактивных частиц с высоты до 21 км происходит за 10 месяцев, а из верхних слоев атмосферы (21—33 км) — 30 месяцев.

Не удивительно, что к 1963 году в результате ядерных испытаний уровень радиации в атмосфере повысился на 7% по сравнению с естественным фоном. Заметим, что в настоящее время уровень радиации соответствует естественному фону.

Человечество осознало опасность ядерных испытаний; главная из них исходит от радиоактивных аэрозолей, для которых не существует границ. В 1963 году был заключен Московский договор о запрещении ядерных испытаний в атмосфере, в космическом пространстве и под водой. Остались незапрещенными подземные испытания, хотя и они не безопасны. Подземный ядерный взрыв на небольшой глубине, когда огненный шар может вырваться в атмосферу, связан с выбросом радиоактивных аэрозолей. Их значительно меньше, чем при наземном взрыве, но все же возможность образования не исключается. При ядерных взрывах на значительной глубине из грунта

просачиваются радиоактивные газы, которые затем адсорбируются на частицах аэрозоля, превращая их в радиоактивные. Вот почему только полное запрещение всех ядерных испытаний способно положить конец этому виду радиоактивного загрязнения воздушного бассейна.

Источниками радиоактивного загрязнения могут быть производства ядерного горючего, а также все другие производства и установки, где применяют естественные или искусственные радиоактивные вещества.

Испытания ядерного оружия, выбросы в атмосферу отходов атомной промышленности — все это привело к необходимости интенсивного изучения закономерностей распространения радиоактивных аэрозолей в масштабе всей планеты. Вместе с тем перемещения воздушных масс и аэрозолей, меченных радиоактивными атомами, открывают перед метеорологами новые возможности для исследования атмосферных процессов. Весь этот сложный комплекс вопросов составляет новую отрасль физики атмосферы и объединен под общим названием «ядерная метеорология».

Вернемся к ядерным взрывам. Ядерная война может предстать в совершенно неожиданном свете, если учесть последствия гигантских пожаров в разрушенных городах. Взметнувшиеся в воздух тучи пыли, особенно сажи, экранируют солнечные лучи. Частицы сажи оседают медленно. Кроме того, сажа непроницаема для солнечного света. В северном полушарии ядерные взрывы могут вызвать лесные пожары и появление аэрозолей, состоящих из продуктов сгорания. Огромные массы аэрозолей приведут к тому, что в первые дни после ядерных взрывов температура воздуха у поверхности земли резко упадет в среднем на 15—20 градусов, а в некоторых местах и больше; все источники воды замерзнут, а урожай и все живое погибнет. Заметим, что эти и другие последствия «ядерной зимы» исследовались при помощи математической модели.

Итак, запрещение и уничтожение ядерного оружия — не просто веление времени, а необходимое условие выживания человечества.

Не остаются без последствий для окружающей

среды и военные действия без применения ядерного оружия. Война в Персидском заливе в начале 1991 года привела к открытию нового — экологического — фронта. Загрязнение нефтью огромной акватории, искусственное образование аэрозолей после многочисленных разрывов бомб, ракет и снарядов, шлейфы нефтяных пожаров — все это создает благоприятные предпосылки для возникновения ситуации, подобной «ядерной зиме».

По сравнению с радиоактивными аэрозолями больший «стаж», если в данном случае вообще можно говорить о стаже (ведь речь идет о варварских методах уничтожения людей), имеют аэрозоли отравляющих веществ (ОВ). Во время первой мировой войны 22 апреля 1915 года на позиции французских войск с немецкой стороны начала двигаться необычная полоса серо-зеленоватого тумана. Образованный из ядовитого газа хлора туман неожиданно накрыл беззащитных людей, обжигал органы дыхания, разъедал легкие. Так к имеющимся средствам уничтожения людей прибавилось химическое оружие. В ходе войны появился ряд других ОВ, среди них наиболее «совершенное» для того времени, получившее название иприт. Капли иприта, составляющие дисперсную фазу аэрозоля, действуют уже на все органы и ткани, с которыми они контактируют.

Научно-технический прогресс, к сожалению, коснулся и химического оружия. Для человека весом 80 кг хватает 1 мг, т. е. всего нескольких капелек современного ОВ, чтобы вызвать летальный исход. Совместные усилия мирового сообщества должны быть направлены на то, чтобы это варварское оружие осталось в прошлом.

### **АЛМАЗНАЯ ПЫЛЬ**

Искусная шлифовка превращает алмаз в драгоценный бриллиант, но мелкие осколки алмаза, попадая в легкие, могут оказаться губительными для человека. Вновь образованная пылевидных частиц алмаза химически активна, а острые грани усугубляют их пагубное действие. Не менее опасен уже упоминавшийся кристаллический кремний.

Не все пылевидные аэрозоли столь же вредны для человека, как свежееобразованная алмазная и кристаллическая кремниевая пыль. Тем не менее насчитывается около ста разновидностей производственных аэрозолей, вызывающих пневмокониозы, хронические бронхиты и заболевания слизистой оболочки верхних дыхательных путей. Пневмокониозы — это группа заболеваний легких, развивающихся при длительном вдыхании пыли. Наиболее его тяжелая форма — силикоз — вызывается пылью диоксида кремния. Особенно опасны мелкие частицы диаметром  $< 3$  мкм.

Диоксид кремния частично растворяется в легочной жидкости; возникают фиброзные очаги, достигающие диаметра 5 см. Болезнь развивается в течение ряда лет. Диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  может содержаться в кремнеземе и в других горных породах. Так, в пыли выбросов новороссийских цементных заводов содержится каолин, в состав которого входит до 10% диоксида кремния.

Безобидный на свободе джинн, попавший в организм человека, становится коварным. Предпочитая хлопок и лен синтетическим тканям, мы вряд ли подозреваем, что на ткацких фабриках почти 10% работающих заболевают профессиональной болезнью. Процесс переработки волокнистых технических культур (хлопка, льна, а также конопли) сопровождается значительным пылевыделением. Вдыхание такой пыли может быть причиной поражения бронхов и легких. Еще более тяжелые последствия вызывает при вынужденной ингаляции пыль асбестового производства. В Берлине около 4 тысяч общественных зданий поражены «асбестовой проказой». Они сооружались в 60-х и 70-х годах, когда асбест широко применялся для нанесения на металлические конструкции в отопительных и вентиляционных системах. (Заметим, что асбест опасен именно в аэрозольном состоянии и потенциально опасен, когда создаются предпосылки к его распыливанию. Готовые асбестовые изделия, особенно окрашенные, безопасны.)

Различные заболевания органов дыхания могут быть вызваны пылью из веществ органического и неорганического происхождения, например талька, глины, слюды, железа, стекловолокна, муки, зерна, сена, грибов, бактерий и др.

Некоторые аэрозоли обладают целым «букетом» губительных действий на организм человека. К ним относятся радиоактивные аэрозоли, речь о которых шла выше, которые, помимо того что поражают органы дыхания, могут вызвать лучевую патологию и злокачественные новообразования.

Сами аэрозольные частицы становятся своеобразным пристанищем для веществ, оказывающих вредное воздействие на организм человека. Так, на пылевых частицах, которые образуются при взрывных работах, адсорбируется диоксид азота. Последующая его десорбция в тканях легких приводит к различным заболеваниям. Подобным образом действуют пары серной кислоты и оксидов серы, которые адсорбируются на пылевых частицах при производстве серной кислоты из серного колчедана.

Сердечно-сосудистые заболевания «помолодели». Одним из виновников нежелательной молодости являются аэрозоли. 20—30 лет тому назад молодых людей с поражением вен и артерий ног практически не было. Теперь они появились. С помощью эмиссионного и атомно-адсорбционного спектрального анализа у этих больных установлено повышенное содержание свинца в крови. Среди заболевших преобладают те, кто имеет дело с этилированным бензином (например, шоферы). Высокое содержание свинца было обнаружено в бедренных костях молодых людей, умерших от инсульта, инфаркта миокарда, артритов. Как уже отмечалось, в отработавших газах двигателей автомобилей содержится некоторое количество свинца, который поступает в воздух в аэрозольном состоянии.

Таким образом, аэрозольное загрязнение воздуха в определенных случаях недопустимо и становится опасным. Очистить воздух до последней пылинки не всегда возможно, да в этом зачастую и нет необходимости — небольшое количество аэрозолей всегда находится в воздушной среде. Но как определить границу опасности?

Для этой цели устанавливают так называемые предельно допустимые концентрации (ПДК), т. е. такие концентрации, выше которых аэрозоли будут представлять опасность для организма человека или могут вызвать другие отрицательные последствия (взрыв, пожар и т. д.). ПДК определяются компе-



тентными органами с привлечением медиков. Законодателем «моды» в определении численных значений ПДК являются органы здравоохранения совместно с ведомствами, в чью компетенцию входит охрана природы.

Не так легко определить численное значение ПДК — для этого проводятся серьезные исследования, но еще труднее их соблюдать. Согласно официальным данным, в воздухе 104 городов нашей страны (в том числе и в Братске, о котором мы упоминали, в Уфе и др.) загрязнение атмосферы порой десятикратно превышает норму. Эти сведения получены путем суммирования всех источников выбросов, в том числе и за счет аэрозолей. Могут быть и местные источники выбросов, вследствие которых ПДК превышает уже в десятки и даже сотни раз.

В тех случаях, когда концентрация аэрозолей значительна и превышает ПДК, необходима фильтрация воздуха, а если это невозможно, то следует прибегать к средствам защиты органов дыхания (о фильтрации и средствах защиты органов дыхания речь пойдет ниже).

В настоящее время разработаны и внедряются различные методы определения концентрации аэрозолей, в том числе и экспресс-методы. Создана целостная система контроля за чистотой атмосферы. Следует, однако, помнить: какими бы совершенными ни были методы контроля, в конечном итоге важен не сам контроль, а исключение любого источника образования вредоносных аэрозолей.

### **НЕВИДИМЫЕ ВРАГИ (АЛЛЕРГИЯ)**

За последние 20—30 лет стали массовыми некоторые болезни, имевшие ранее ограниченное распространение. В их числе — аллергия, т. е. повышенная чувствительность организма к воздействию некоторых факторов окружающей среды. По своей массовости аллергические заболевания заняли третье место после сердечно-сосудистых и онкологических. В некоторых странах от аллергии страдает до 10% населения.

Вспышка аллергических заболеваний (как свое-

образная обратная сторона технического прогресса) вызвана химизацией всех сфер нашей жизни, широким применением антибиотиков и других лекарственных препаратов, а главное, потерей сопротивляемости организма.

Термин «аллергия» был введен в 1906 году австрийским педиатром К. Пирке для обозначения необычной реакции детей на отдельные лекарственные препараты. Некоторые виды пищевой аллергии описал Гиппократ, а другой знаменитый врач древности Гален (2 в. н. э.) сообщал о насморке, возникающем от запаха роз. Только в XIX веке была описана сенная лихорадка, которая вызывается вдыханием пыльцы некоторых растений. Из всех видов аллергических заболеваний мы остановимся только на тех, которые провоцируются аэрозолями, а их немало — добрая половина.

Для заболевания достаточно, чтобы на слизистую оболочку носа или конъюнктивы глаз попала 40—50 пылинкок сорняка амброзии, а для более восприимчивых иногда хватает 3—5 пылинок. Амброзия, которая нашла себе приют в Краснодарском и Ставропольском краях и в Грузии, продуцирует пылевидный аллерген (источник аллергических заболеваний). Ее пыльца, частички которой не превышают 35 мкм и которая порой невидима, образуется в больших количествах. Заметим, что амброзия распространилась лишь после минувшей войны. Этот сорняк попал к нам на колесах известных тогда машин американского производства — «студебеккеров». Сорняку настолько понравилась наша земля, что потомки превзошли предков по масштабам своей «деятельности».

В каждом климатогеографическом районе свои, местные поставщики аллергической пыльцы. В центральных районах европейской части нашей страны — это луговые травы: тимopheевка луговая, ежа сборная, овсяница луговая. В Казахстане — полынь и дикая конопля; в Узбекистане — хлопчатник, чинара, грецкий орех; в Грузии — кроме амброзии, пратан, некоторые злаковые травы.

Аллергические заболевания, вызываемые пылью растений, называют поллинозом. Если насморк длится неделями и к тому же сопровождается слезотечением

и резью в глазах, то это явно не простуда, а поллиноз. Иногда аллергия кончается приступами бронхиальной астмы. Если заболевание поллинозом носит сезонный характер и проявляется в период цветения растений, то бронхиальная астма — уже хроническое заболевание органов дыхания, при котором возникают приступы удушья.

Пыльца растений содержится в воздухе сельскохозяйственной местности. Может создаться ложное впечатление, что горожане страдают аллергией меньше, чем сельские жители. Это заблуждение — в загрязненном воздушном бассейне городов аллергенов больше чем достаточно. Что только не может быть аллергеном! Даже в парикмахерских и косметических кабинетах ими могут оказаться красители для волос, бровей и ресниц, парфюмерные вещества, жидкости для волос. Если мы стали бы перечислять аллергены в различных отраслях промышленности (химической, металлургической, биологической, медицинской и других), то это заняло бы не одну страницу. Проще, по-видимому, перечислить вещества, которые не вызывают аллергических заболеваний. Отметим, что промышленные отходы в виде аэрозолей (особенно туманы) поражают не только органы дыхания, но и кожу (так называемые аллергические профессиональные контактные дерматиты).

Существует еще один коварный, главным образом городской, бытовой аллерген — это домашняя пыль. Аллергенами могут быть пылевые частицы ковров, одежды, постельного белья и даже газет. Отдельную группу бытовых аллергенов составляют аэрозоли «живого» происхождения: грибки на стенах сырых комнат, остатки домашних насекомых. К этой же группе относятся волосы, шерсть и перхоть домашних животных. Любителям домашних аквариумов следует напомнить, что аллергеном может оказаться рачок дафния, служащий кормом для рыб. Домашние хозяйки очень часто придерживаются принципа «кашу маслом не испортишь», который при пользовании стиральными порошками и другими препаратами бытовой химии оказывается далеко не безобидным. Перечисленный «букет» источников бытовых аллергенов чаще всего вызывает аллергический насморк, а в более тяжелых случаях — бронхиальную астму.

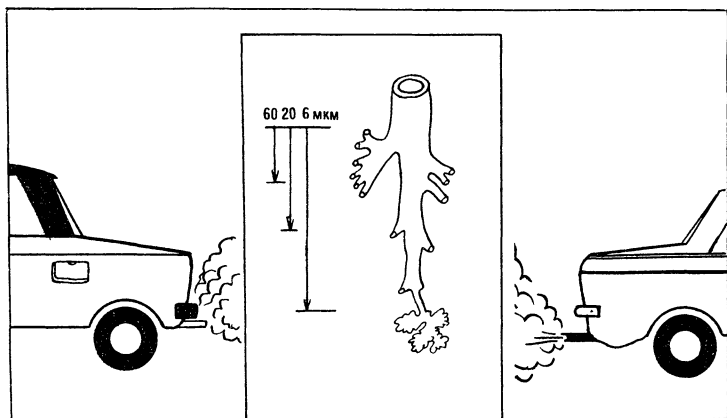
Аэрозоли, как мы еще раз может убедиться, могут быть не только друзьями и помощниками, но и врагами, которых порой трудно распознать. Джинн, согласно арабской мифологии, выступает в роли то доброго, то злого духа.

## УКРОЩЕНИЕ ДЖИННА

### ЧЕЛОВЕК — ФИЛЬТР

Воздух, который вдыхает человек, представляет собой не что иное, как аэрозоль и, как уже отмечалось, всегда содержит определенное количество частиц дисперсной фазы. Человек в покое ежеминутно перерабатывает в среднем 7,5 литров воздуха, т. е.  $\approx 11$  тысяч литров ( $11 \text{ м}^3$ ) в сутки. Если принять, что массовая концентрация аэрозолей равна  $1 \text{ мг/м}^3$ , то за сутки в органы дыхания вместе с воздухом может быть занесено до 18 мг вредных веществ. На вскрышных карьерах и других пылеопасных объектах масса частиц, вдыхаемых вместе с воздухом, достигает нескольких сот миллиграммов. Казалось бы, человеческий организм должен был бы зарастать изнутри.

Но подавляющая часть аэрозольных частиц не доходит до легких. Струя выдыхаемого воздуха отгоняет аэрозольные частички и служит первой предварительной ступенью своеобразного фильтра. Второй ступенью является дыхательная система человека, которая состоит из ряда разветвленных ходов, уменьшающихся по ширине и растущих в числе. Воздух через нос или рот проходит через трахею, бронхи, бронхиолы, альвеолярные ходы (диаметром около 0,2 мм), наконец поступает в альвеолы. Перегородки, косточки и волосинки в полости носа представляют собой эффективную фильтрующую систему для относительно крупных аэрозольных частиц. Реснички, покрывающие дыхательные пути выше бронхиол, улавливают частицы, осаждающиеся в этой области дыхательной системы. В носоглотке, трахее и бронхах оседает от 40 до 90% аэрозольных частиц диаметром свыше 10 мкм. Более мелкие частицы задерживаются легкими.



Путь аэрозолей в дыхательной системе человека

Между двумя ступенями очистки существуют принципиальные различия: в одном случае воздух ничем не стеснен и может перемещаться в любом направлении (джинн на свободе); во втором случае запыленный воздушный поток ограничен стенками и движется в определенном направлении (джинн еще не укрощен, но лишен свободы перемещения).

Дыхательная система человека — не просто фильтр, а самоочищающийся фильтр. Постоянная очистка дыхательного тракта осуществляется мерцательным эпителием, выстилающим полость носа, трахеи и бронхов. Он представляет собой слой клеток, снабженных ворсинками длиной 35—40 мкм, которые совершают непрерывные колебательные движения с частотой два колебания в секунду. В результате происходит перемещение вязкого текучего слоя слизи вместе с осевшими пылинками со скоростью 0,4—0,6 см / мин, т. е. от входа в нос до зева пылинки могут продвинуться за 15 минут. Из глотки пыль вместе со слизью попадает в желудочно-кишечный тракт. Чем меньше размеры частиц и выше скорость воздуха (чаще дыхание), тем с большей вероятностью аэрозольные частицы попадут в легкие и осядут в них. Можно считать, что в легкие поступают частицы диаметром менее 1 мкм.

Альвеолы легких — это последняя ступень фильтрующей системы организма человека на пути аэрозо-

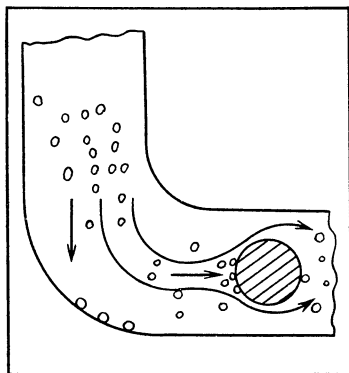
лей. Эта ступень, однако, очень чувствительна к загрязнениям, которые, как мы уже отмечали, могут стать причиной различных болезней. Некоторая доля аэрозольных частиц не осаждаются и удаляются с выдыхаемым воздухом. Большинство аэрозольных частиц проходит через альвеолярные мембраны в свободном состоянии и проникает в легочную ткань. Некоторые вещества и небольшая часть осевших частиц могут попасть в кровеносную систему. Не задерживаются в легких и выдыхаются обратно выскодисперсные частицы диаметром менее 0,1 мкм.

При ингаляции (речь о ней шла выше), когда повышенная концентрация препарата создается искусственно (чтобы лекарство подействовало максимально), в дыхательных путях осаждаются более крупные частички. В трахеи проникают частицы ингаляционного препарата диаметром не выше 50 мкм, в бронхи — до 30 мкм. Частицы до 5 мкм могут содержаться в воздухе, который выдыхает человек.

### **ПО ИНЕРЦИИ**

Осаждение частиц зависит, в первую очередь, от величины, направления и скорости воздушного потока и аэрозольных частиц, движущихся с этим потоком. Скорость воздуха в дыхательной системе по мере приближения к альвеолам непрерывно уменьшается. Если принять скорость воздуха в трахее за единицу, то в бронхах она составляет 0,5, в бронхиолах — 0,001, а в альвеолах снижается практически до нуля. Изменяется и направление воздушного потока в носоглотке, при переходе из трахеи в бронхи. Следить за перемещением аэрозольных частиц (в том числе и в дыхательной системе) можно при помощи так называемых линий тока, которые представляют собой касательные к скоростям в различных точках воздушного потока. При установившемся движении, что имеет место в дыхательном тракте, траектории аэрозольных частиц совпадают с линиями тока.

Бумажный кораблик в весеннем ручейке покорно движется, увлекаемый током воды. Стоит потоку сделать изгиб, как кораблик перестает «слушаться» и будет продолжать движение по инерции вопреки



Препятствие может оказаться непреодолимым

направлениям линий тока, пока не причалит к берегу. Подобным образом ведут себя частицы в потоке воздуха, который встречается с препятствием. Воздух обтекает препятствие, при этом изменяется линия тока. Относительно крупные частицы, подобно корабliku, движутся по инерции, покидают линии тока и устремляются к поверхности препятствия, а затем и осаждаются на ней. Частицы же небольших размеров увлекаются воздушным потоком, двигаются по линиям тока, обтекая препятствие. Препятствиями могут быть поверхности на пути воздушного запыленного потока, повороты, закругления и любые другие предметы, которые изменяют направление движения потока.

Сколько же частиц осаждается из потока на препятствие? Этот вопрос далеко не праздный. Причалит или не причалит кораблик — это из области спортивных интересов. От того, осядут ли частицы, задержатся или сумеют легко обойти препятствие, зависит очистка запыленного воздуха, а следовательно, и эффективность фильтрации.

Количественно оценить осаждение частиц можно при помощи коэффициента захвата, который показывает отношение числа частиц, осевших на препятствие, к числу частиц, находившихся в потоке до препятствия. Коэффициент захвата равен единице в том случае, когда все частицы в потоке (точнее, в сечении, равном площади препятствия) осаждаются на поверхности препятствия.

Физический смысл коэффициента захвата можно пояснить на простом житейском примере. Чтобы избавиться от мух, пользуются липучками. Стоит насекомому коснуться лапками липкой поверхности, как оно превращается в пленника. Коэффициент захвата (понятно, что в данном случае допускается условность) равен 1. Когда липкий слой подсохнет и некоторые наиболее сильные особи вырвутся из плена, коэффициент захвата становится меньше единицы. Если липучка полностью исчерпает свои возможности, коэффициент захвата будет равен нулю.

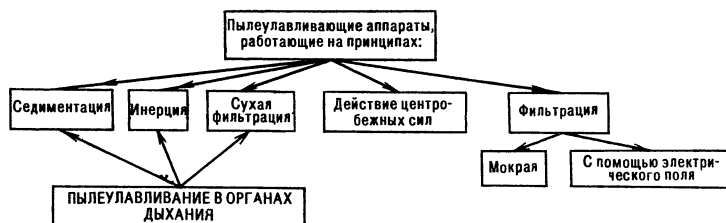
Коэффициент захвата позволяет определить общее число частиц, осевших на препятствии за определенное время. Запыленный воздушный поток может встретиться с иголочной булавкой, шпилем собора Петропавловской крепости или с воздушным шаром, т. е. с объектами самыми разными; в самом потоке могут находиться частицы различного размера. Варьируя вязкость, плотность и скорость воздушного потока с учетом размеров препятствия и частиц, можно изменять коэффициент захвата и таким образом управлять механизмом инерционного осаждения аэрозольных частиц и регулировать количественно полноту осаждения.

Фильтрующая способность дыхательной системы основана на различных принципах. Эти же принципы осуществляются при очистке от аэрозолей атмосферного воздуха и газов в промышленных пылеулавливающих аппаратах.

### **ЗАГНАТЬ ДЖИННА В БУТЫЛКУ!**

Давний, дедовский способ защиты воздуха от аэрозолей заключался в рассеивании вредных веществ в атмосфере. Различные примеси, попадающие в атмосферу из дымовых труб вентиляционных шахт и других устройств, разносились на большие расстояния, рассеивались, и в конце концов их концентрация становилась меньше предельно допустимой. Можно было мириться с этим своеобразным способом, пока таких локальных источников загрязнений было немного, скажем, более 100 лет тому назад. Сейчас этот способ как мера защиты атмосферы уже не годится, как раз наоборот.





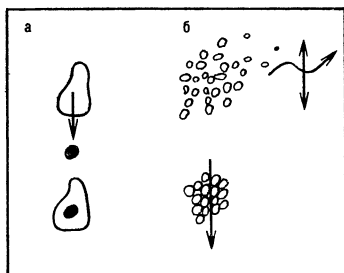
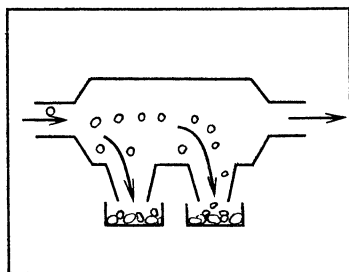
Для того чтобы выпустить джинна из бутылки, порой не требуется никаких усилий. Дымовые трубы тому подтверждение. Загнать джинна в бутылку, т. е. разрушить аэрозоли, значительно труднее. Очистка газов (воздуха) от аэрозолей, т. е. пылеулавливание, осуществляется в различных аппаратах. (Термин «пылеулавливание» не совсем точен, так как улавливаются все аэрозоли, в том числе и туманы.)

В органах дыхания воздух очищается от аэрозолей. Они действуют как сложный пылеулавливающий аппарат (см. схему), который предотвращает или, во всяком случае, снижает возможность попадания аэрозолей в организм. Очистка воздуха в дыхательной системе осуществляется на тех же принципах, на которых работает значительная часть пылеулавливающих аппаратов в промышленности.

Для улавливания джинна прежде всего его надо вернуть на землю, а затем уже загонять в бутылку. Аэрозоли в бутылку загнать довольно трудно. Для того чтобы аэрозоли перестали быть аэрозолями, необходимо извлечь из них частицы, т. е. очистить газовую среду.

Относительно крупные частицы, главным образом грубодисперсные, под действием гравитационной силы способны оседать (седиментировать). С этим процессом мы уже познакомились. Гравитационное оседание с последующим удержанием частиц на увлажненной поверхности наблюдается в воздушном тракте органов дыхания, а именно — в трахеях легких.

На принципе оседания работают пылеосадительные камеры. Один из видов пылеулавливающих аппаратов, с пылеосадительными камерами, показан на рисунке. Из горизонтально движущегося запыленного потока происходит оседание частиц, которые затем накапливаются в пылеосадительных камерах.



Укротить джинна можно при помощи пылеосадительной камеры

Укрупнение аэрозольных частиц путем захвата каплями воды (а) и коагуляции (б)

Оседание частиц способствует самоочищению атмосферного воздуха. Подобное самоочищение, однако, не всегда желательно. Так, соревнования по бобслею во время зимних Олимпийских игр в феврале 1988 года пришлось перенести: трасса скоростного спуска была так сильно загрязнена пылью из воздуха, что для ее очистки потребовалось какое-то время.

За счет седиментации атмосферный воздух освобождается только от довольно крупных частиц. Подобное наблюдается в пылеосадительных камерах, которые позволяют улавливать до 90% частиц диаметром свыше 50 мкм.

Повысить эффективность очистки газов на основе принципа седиментации можно, если «утяжелить» частицы и тем самым увеличить скорость их оседания (седиментации). Один из способов увеличения массы частиц подсказан природой. После дождя воздух становится чистым; происходит это потому, что капли дождя захватывают взвешенные аэрозольные частицы, которые обычно мельче дождевых капель. Капли вместе с аэрозольными частицами достигают поверхности земли. На этом принципе основано пылеподавление, особенно в местах постоянного и мощного источника пылеобразования (карьеры, шахты, вскрышные работы и др.). Орошение создается искусственно, а для большей его эффективности вводят различные добавки, в том числе и ПАВ.

При укрупнении частиц (напомним, что этот процесс называется коагуляцией) их оседание ускоря-

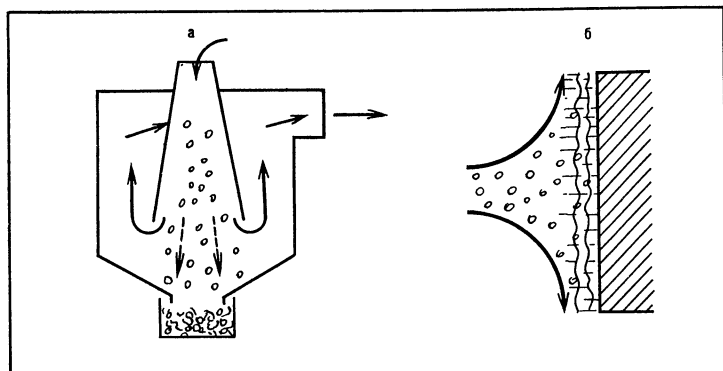


Схема инерционного осаждения в аппарате (а) и на увлажненной поверхности (б)

ется, а следовательно, снижается время очистки. Укрупнение частиц в пылеулавливающих аппаратах вызывается искусственно. Для этой цели используют, например, ультразвук, электрическое поле и другие способы внешнего воздействия на аэрозоли.

Вернемся к инерционному процессу осаждения аэрозольных частиц. Инерционные пылеулавливатели работают на принципе резкого изменения направления движения запыленного газового потока. Частицы по инерции будут стремиться двигаться в направлении, отличающемся от линий тока, что позволяет выделить их из запыленного потока.

Рассмотрим работу инерционного пылеулавливателя на примере одного из вариантов промышленного аппарата, схема которого приведена на рисунке (а). Запыленный поток сначала направляется вниз по расширяющемуся конусу, а затем поворачивается на  $180^\circ$  и выводится сверху. Аэрозольные частицы продолжают свое движение по инерции (показано пунктирной линией) и собираются в бункере аппарата. Инерционное осаждение можно направить на препятствия, находящиеся на пути запыленного потока (см. рисунок б), подобно кораблику в потоке.

Инерционное осаждение не всегда приводит к улавливанию частиц; они могут отскочить от поверхности или быть унесены воздушным потоком. Для лучшего закрепления увлажняют поверхность, на которой осаждаются частицы, а также придают ей

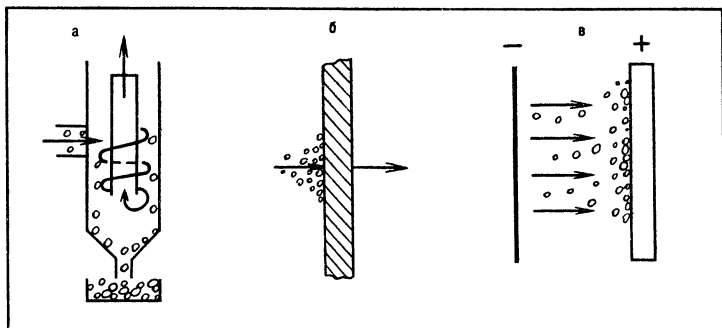
ворсистость. Кстати, большая часть дыхательного тракта человека увлажнена и покрыта ворсинками. Заметим попутно, что волосяной покров кожи выполняет ту же функцию по отношению к атмосферным аэрозолям и в известной степени защищает кожу от вредного воздействия пыли.

Помимо седиментационного оседания и инерционного осаждения в промышленных пылеулавливающих аппаратах очистка воздуха от мелких аэрозольных частиц (диаметром менее 1 мкм) осуществляется, как и в дыхательном тракте, за счет броуновского движения, диффузии, термодиффузионфореза (эти процессы были рассмотрены в начале книги).

### **ВОЗВРАЩЕНИЕ НА КРУГИ СВОЯ**

Для «возвращения на круги своя», т. е. для разрушения аэрозолей, применяется целая система аппаратов, обеспечивающих очистку воздуха. Мы успели познакомиться с теми из них, чья работа основана на тех же принципах, что и осаждение частиц в органах дыхания. В пылеулавливании, однако, применяются и другие приципы осаждения. Речь идет прежде всего о центробежном осаждении частиц. Для уяснения обратимся к известному явлению природы. Ежегодно в летнюю пору в разных уголках земного шара, где стоит жаркая погода, возникают вертикальные воздушные вихри, именуемые смерчами. В центральной части смерча давление воздуха понижено; на его периферии происходит круговоротное движение воздуха со скоростью до 100 км/час. В круговоротное центробежное движение вовлекаются аэрозольные частицы, а большая скорость и существенный перепад давления позволяют смерчу крушить все на своем пути. Вовлекаемые в смерч предметы сосредоточены на периферии воронкообразного центра. Этот принцип лежит в основе центробежного осаждения частиц.

Скорость вращения воздушного потока в некоторых аппаратах достигает нескольких десятков и даже сотен метров в секунду (100 м/сек — 36 км/час), т. е. может быть такой же, как и в вихре смерча. Отсутствие перепада давления и ограниченная масса аэрозолей, вовлекаемых в этом случае в центробежное



Улавливание аэрозолей в циклонах (а), фильтрах (б) и в электрофильтрах (в)

движение, делают его не столь разрушительным. Центробежное осаждение частиц осуществляется в пылеулавливающих аппаратах, которые называются циклонами (рисунок а). Запыленные газы направляются в цилиндрическую часть циклона и совершают движение по спирали. Аэрозольные частицы получают центробежное ускорение, в сотни и даже тысячу раз превышающее ускорение силы тяжести. Частицы не в состоянии следовать за линиями тока газа и под действием центробежной силы прижимаются к стенке, осевшая пыль собирается затем в пылесборнике, а очищенный газ направляется в трубу. В циклонах запыленный поток очищается за счет центробежного осаждения частиц на стенках корпуса аппарата, который выполняет роль своеобразной фильтрующей поверхности.

Обычно слово «фильтр» ассоциируется со словом «сито». Подобное сравнение применимо к пористым фильтрам (рисунок б). Процесс фильтрации осуществляется через пористую перегородку; в ходе процесса взвешенные в газе твердые или жидкие частицы задерживаются, а газ полностью проходит через слой фильтрующего материала. Типичным примером является воздушный фильтр двигателя автомобиля (кстати, в Чернобыле именно они подвергались наибольшему загрязнению).

Промышленные фильтры, рассчитанные на очистку отработанного газа перед выбросом его в атмосферу, обеспечивают улавливание аэрозольных за-

грязнений высокой концентрации, составляющей порой несколько сот миллиграммов в кубическом метре. Осаждение частиц и улавливание фильтрами, также как и в случае инерционного осаждения, определяется коэффициентом захвата, но уже по отношению не к препятствиям, а к волокнам или зернам фильтра.

Разработаны и применяются в качестве пылеулавливающих аппаратов электрофильтры (рисунок в), в которых осаждение аэрозольных частиц происходит за счет электростатического притяжения. Вспомним простой школьный опыт. Стоит потереть эбонитовую или стеклянную палочку шелком или сукном, как она начинает притягивать кусочки бумаги. По тому же принципу действует электрическое поле на заряженные аэрозольные частицы. В электрическом поле напряженностью  $E$  возникает электростатическая сила  $F_z$ , которая равна произведению  $E$  на величину заряда аэрозольных частиц  $q$ . Казалось бы, чем больше заряд частиц и напряженность электрического поля, тем значительнее воздействие на аэрозольные частицы электростатической силы. Однако есть предел — при повышении напряженности электрического поля возможен пробой, что резко снижает эффективное воздействие электрического поля на аэрозоли.

У электрофильтров имеется два электрода — коронирующий и осадительный. На первом создается коронный разряд и обеспечивается максимальный заряд аэрозольных частиц одного и того же знака. Заряженные частицы устремляются к осадительному электроду, освобождая газовый поток от своего присутствия.

Электрофильтры обеспечивают хорошую степень очистки, но при высокой температуре они перестают быть безопасными. На помощь приходят пылеулавливающие аппараты мокрой очистки, которые, однако, для своей работы требуют большого расхода воды. Поэтому их следует применять только в том случае, когда другие сухие способы фильтрации недоступны.

Степень очистки газа (воздуха) пылеулавливающими аппаратами зависит от размеров аэрозольных частиц. Крупные частицы диаметром более 50 мкм удаляются из воздуха в пылеосадительных камерах за счет седиментации; частицы свыше 10 мкм улавливаются циклонами; тканевые фильтры задерживают частицы размером не менее 3 мкм, а электрофильтры — не менее 1 мкм.

Фильтры Петрянова (ФП) обеспечивают высокую степень очистки воздуха, содержащего частицы менее 1 мкм. Необходимость избавиться от мелких частиц возникает довольно часто. Так, всего одна частица диаметром 0,5 мкм, проникнув с воздухом внутрь агрегата, может нарушить работу сложного электронного устройства.

ФП состоят из волокон, которые изготавливают из тонких нитей толщиной от десятых долей микрометра до нескольких микрометров. Волокна могут быть получены, в частности, из перхлорвинила, ацетилцеллюлозы, полиарилатов, фторполимеров и других материалов. Волокна в виде слоя толщиной в 1 мм и более наносят на какую-либо подложку, например на марлю.

На пористых фильтрах крупные частицы задерживаются, а мелкие могут пройти. Фильтрующие свойства пористых фильтров (сит) определяются диаметром отверстия. В процессе работы эти отверстия забиваются частицами, фильтры начинают оказывать большое сопротивление запыленному потоку и наконец перестают работать.

ФП действует по другому принципу: они не просеивают, а буквально ловят частицы. Диаметр нитей соизмерим с размерами частиц, а расстояние между нитями в сотни и даже тысячи раз больше. Частицы прилипают к нитям — за счет сил межмолекулярного взаимодействия и электростатического притяжения. Вероятность прилипания к одной нити, особенно мелких частиц, все же недостаточна. ФП состоит из множества нитей, которые образуют своеобразный лабиринт. Проходя по нему, аэрозольные частицы, в том числе и мелкие, невольно столкнутся хотя бы с одной нитью (эффект касания) и прилипнут

к ней. Помогает частицам осесть броуновское движение. Для относительно крупных частиц этот же эффект достигается за счет седиментации и инерционного движения (вспомним пример с корабликом). Во всех случаях осаждению частиц способствует электростатическое взаимодействие.

Благодаря совокупному действию всех составляющих осаждается большая часть аэрозольных частиц. Поскольку расстояния между нитями сравнительно большие и самих нитей много, размеры отверстий между волокнами остаются практически постоянными, а фильтрующая поверхность достигает огромных размеров, так что срок действия волокнистых фильтров довольно продолжителен, а необходимость их очистки отпадает.

К числу особенностей ФП относится сравнительно трудное улавливание не самых мелких частиц, как это имеет место при осуществлении механизма «сито», а некоторых так называемых «ленивых частиц», имеющих диаметр 0,1—0,2 мкм. Этот недостаток можно устранить, подобрав подходящий материал и размер нитей волокна, а также скорость фильтрации.

Помимо степени очистки важной характеристикой фильтрующего материала является сопротивление воздуху  $\Delta P$ , которое измеряется в миллиметрах водяного столба при скорости фильтрации 1 см/с. Для очистки воздуха, поступающего в органы дыхания, применяют респиратор типа «лепесток». В нем только 10 г ФП, которые обладают ничтожным сопротивлением — всего 3 мм вод. ст. Через такой респиратор дышать сравнительно легко. Заметим, что в обычном противогазе сопротивление дыханию увеличивается в несколько раз. По эффективности очистки газов и воздуха фильтры Петрянова не имеют аналогов. Они эффективны, когда концентрация аэрозолей в 200 и более раз превышает ПДК. В электронной промышленности ФП обеспечивают требуемую чистоту воздуха — 5 частичек размером менее 0,5 мкм на 1 литр воздуха (сравните: на лесной лужайке чистый воздух содержит триллион подобных частиц).

Волокнистые фильтры обладают еще одной замечательной возможностью — они позволяют улавливать частицы, когда их счетная концентрация незначитель-



на. Потребность в этом возникает при отборе проб аэрозолей для их последующего анализа. Поэтому отбор ведется при больших скоростях фильтрации до 40 м/с (или примерно до 20 км/час). Такая большая скорость дает возможность пропускать через фильтры значительные объемы запыленного газа и иметь для анализа необходимое число частиц.

Фильтрами Петрянова пользуются строители, шахтеры, металлурги; их применяют в тех отраслях производств, где необходимо избавиться от аэрозолей, и, например, для защиты экспонатов Оружейной палаты и Алмазного фонда. Они способны улавливать практически все аэрозольные загрязнения — радиоактивные, бактериальные и прочие. Ионообменные волокна позволяют освободиться от кислот и сжиженных газов, в частности от жидкого гелия. Материал ФП не только задерживает вредоносные вещества, но и препятствует утечке тепла и распространению шума. Ушные противoshумные вкладыши «беруши» тому подтверждение.

Уже более полувека фильтры Петрянова надежно очищают воздух от высокодисперсных аэрозолей. Все работы в зоне загрязнения Чернобыльской АЭС проводились с использованием индивидуальных средств защиты на основе волокнистых фильтров. ФП «работают» и за пределами земли; их уже длительное время используют для улавливания и анализа космических аэрозолей.

Никакие фильтры, в том числе и высокопроизводительные и сравнительно дешевые, не в состоянии справиться с все увеличивающимся количеством вредных аэрозольных выбросов. Трудности укрощения джинна порой несоизмеримы с теми усилиями, которые были затрачены на высвобождение его из бутылки. Выход один — создавать такие условия, чтобы джинн был не в состоянии вырваться на свободу.

### **САМА ПРИРОДА**

Извлечению огромных масс раздробленных веществ из атмосферы способствует лес, который выполняет роль гигантского фильтра. Фильтрующие возможности леса огромны. Листья различных пород

деревьев вблизи цементных заводов улавливают до 90% пыли,— и из зеленых деревья превращаются в серые. За год суммарное количество пыли, улавливаемой различными породами деревьев на площади 1 га, колеблется от 20 до 60 тонн. Пыльцы амброзии, которая, как мы уже знаем, вызывает аллергию и болезнь растений, в 100 м от опушки леса в густом хвойном лесу содержится в 5 раз меньше, т. е. она в основном на 80% поглощается лесом. Над лесными массивами бактериальных аэрозолей почти нет, что объясняется действием озона и фитонцидов, выделяемых растениями и обладающих бактерицидными свойствами.

Через полог крон внутрь лесного пространства проникает лишь незначительная часть аэрозольных частиц. Содержание пыли уменьшается по направлению движения ветра, порывы которого обычно не проникают более 500 метров в глубь леса. Неудивительно, что в лесу концентрация аэрозолей в 20—30 раз меньше, чем в городе.

Для запыленного воздушного потока лес представляет собой громадное препятствие, состоящее из множества простейших «деталей» — листьев, иголок, сучков, стволов и т. п. Относительно крупные частицы задерживаются верхней кроной деревьев, куда они поступают в результате гравитационного оседания (седиментации). Инерционное осаждение имеет место по направлению движения запыленного потока. Как и в дыхательной системе, мелкие частицы осаждаются за счет таких процессов, как броуновское движение, диффузия и других, характерных для высокодисперсных систем. Тонкие волосинки растений, так же как и ворсинки дыхательных путей, захватывают аэрозольные частицы, заставляя их осаждаться.

В конечном счете очистительная функция леса определяется особенностями зеленой кроны деревьев. Так, хвойные породы удерживают больше частиц по сравнению с лиственными. Большинство частиц удерживается у основания игольных мутовок на концах веток. У дуба пылевые частицы скапливаются в маленьких, покрытых плоскими ложбинками поперечных жилках листа, причем черешки листа удерживают загрязнения лучше, чем веточки, стебли и листья.

Отложений пылевых частиц на шершавых листьях

подсолнечника примерно в 20 раз больше, чем на гладких листьях тюльпанного дерева. На ворсистых листьях крапивы пыль скапливается на кончиках и по краям. Чем крупнее лист, тем меньше осаждается на нем пыли в расчете на единицу поверхности.

Некоторые виды грибов (свинушки, волнушки) способны улавливать большее число аэрозольных частиц по сравнению с другими грибами (помните об этом, собирая грибы!). Еще одно обстоятельство способствует осаждению и закреплению в лесу атмосферных аэрозолей — это увлажненная и клейкая (за счет соков и смолы) поверхность, характерная для многих деревьев.

Если бы аэрозольные загрязнения все время накапливались на листьях, стеблях, иголках, то в конце концов они покрылись бы панцирем, и жизнь растений прекратилась. Уловив аэрозольные загрязнения из воздуха, растения затем направляют их в «кладовую». Такой кладовой является почва. Ветер и вызванные им колебания деревьев, осадки, особенно дожди, заставляя загрязнения вернуться на землю. Листья дуба, например, уже спустя час после осаждения аэрозольных частиц, теряют почти 90% этих частиц, а хвоя сосны — только 10% первоначально уловленных частиц. После дождя на листьях деревьев пыли остается примерно в 10 раз меньше.

Дождевые капли выполняют двоякую функцию: с одной стороны, они очищают лес от налипшей пыли, а с другой, — при оседании капли могут захватывать аэрозольные частицы и подавать их на крону растений; в результате преобладает все же очистительная функция дождя.

В лесу почва наравне с деревьями участвует в поглощении атмосферных аэрозольных загрязнений, причем их защитные функции порой тесно связаны. Вокруг обогатительных фабрик, цементных и магнизовых заводов, предприятий по выплавке черных металлов, например, слой осевших аэрозольных частиц может достигать нескольких сантиметров. Почва выступает одним из факторов очищения воздуха от аэрозолей, хотя сама страдает от этого. Поэтому почва стремится освободиться от нежелательных загрязнений и вернуть их растениям, которые в некоторых случаях опять превращают эти загрязнения

в аэрозоли. Часть свинца, которая образуется при выхлопе двигателей автомобилей, попав в почву, затем переходит в растения. Тростник способен и на большее — он поглощает ртуть из загрязненной почвы и в виде паров через поры, своеобразные устья, посылает их снова в воздух.

Далеко не все поглощенные лесом аэрозольные загрязнения безвредны для него. Невосполнимый урон лесу приносят кислотные дожди, о которых речь шла выше. Аэрозольные выбросы предприятий химической промышленности, содержащие серу, хлориды, карбид кальция и ряд других соединений, вызывают болезнь многих растений и леса. Выбросы Щекинского производственного объединения «Азот» и металлургических предприятий Тульской области губят вековые деревья в Ясной поляне — усадьбе Л. Н. Толстого. Алюминиевый завод в Братске «прославился» тем, что потравил ангарскую сосну на сотни километров.

Не менее опасными для леса бывают порой и твердые аэрозольные частицы. Из них наиболее вредное действие на растения оказывают промышленные аэрозоли, содержащие частички тяжелых металлов, а также магнетитовая и доломитовая пыль.

В листьях растений, растущих вдоль улиц, в годы интенсивного применения зимой хлоридных солей для борьбы с обледенением дорог скапливалось до 100 мг хлоридов на 1 кг сухой массы. Листья знаменитых киевских каштанов в результате этого были поражены некрозом. Такой способ борьбы с гололедом иначе как варварским не назовешь.

Растения реагируют на аэрозоли и являются индикаторами загрязненности атмосферы воздуха. В отличие от аналитических приборов растения фиксируют все загрязнения, обладая порой уникальной чувствительностью. Многие виды лишайников, водорослей и мхов погибают при ничтожном содержании в воздухе некоторых газообразных и пылевидных примесей. Обыкновенные сосна и ель крайне чувствительны к самым различным по химическому составу атмосферным загрязнениям. Сосновый лес вблизи реки Припять не выдержал воздействия Чернобыльских радионуклидов и из зеленого превратился в рыжий, этот «рыжий лес» пришлось вырубить и захоронить.

Растительный мир, и лес в том числе, выполняет свои очистительные функции бескорыстно, как это «задумано» природой. Человеку нужно только позаботиться о том, чтобы создать для растений нормальные условия и беречь зеленого друга, не уничтожая его с бездумной расточительностью.

### **ЗАКРЕПОСТИТЬ ДЖИННА**

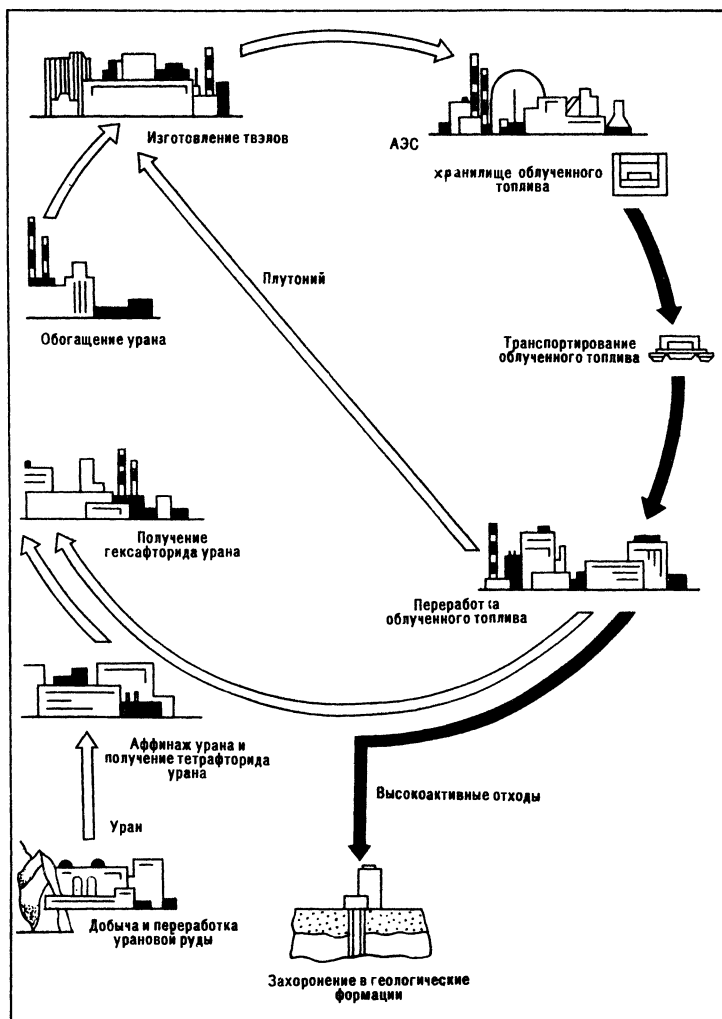
По расчетам академика И. В. Петрянова-Соколова, только 2% природных материалов вовлекается в промышленное производство, а 98% становятся отходами. Начиная с 1900 года объем промышленной продукции ( $y$ ) и отходов увеличивается во времени ( $x$ ) по экспоненциальному закону, выражаемому функцией типа  $y = e^x$ , причем экспонента отходов опережает экспоненту роста продукции, а расходы на очистку и переработку отходов превышают все предыдущие. Значительная часть отходов буквально вылетает в трубу, порождая аэрозоли.

В начале предыдущей главы мы говорили о масштабах выбросов, которые имеют тенденцию к возрастанию.

Вытащить человечество из трясины экологического загрязнения может только само человечество, конечно не по-мюнхгаузеновски, рукой за собственные волосы, а совместными усилиями.

Наиболее эффективный и надежный способ охраны окружающей среды—создание безотходных производств. Смысл термина «безотходное производство» представляется ясным — производство без отходов. Однако это понятие многозначно. Что такое, собственно, отходы? Можно ли считать отходом пыль цементных заводов, содержащую готовые и исходные продукты? По современным представлениям отходы—это продукты или полупродукты, которые бесполезно теряются в процессе производства либо по тем или иным причинам не используются рационально.

При безотходном производстве джинн утрачивает возможность покинуть бутылку и, оказавшись «закрепощенным», становится максимально полезным. Идея безотходных производств возникала по образцу существующей в природе взаимосвязи процессов, когда в общую цепочку «расход — потребление



Замкнутый ядерный топливный цикл, включающий получение и применение горючего

ние» вовлекаются продукты жизнедеятельности всех организмов и не происходит избыточного накопления «отходов».

Можно сформулировать три основных принципа безотходных производств: комплексное использование

сырья, максимальный выход готового продукта и замкнутые технологические циклы. Рассмотрим, как осуществляется замкнутый производственный цикл на примере экологически опасного производства ядерного топлива (см. рисунок). Цикл включает предприятия, связанные с добычей и переработкой урановой руды, аффинажем урана (очищение от примесей) и получением гексафторида урана, обогащением урана и получением твэлов (тепловыделяющих элементов). Твэлы поступают на АЭС (атомные электрические станции), загружаются в активную зону реактора и обеспечивают выработку электроэнергии.

После облучения твэлов начинается второй цикл (на рисунке он показан черной стрелкой). Отработавшее ядерное топливо высокой активности и содержащее продукты деления направляется в хранилище облученного топлива, где происходит снижение активности за счет короткоживущих радионуклидов. Затем топливо транспортируется в специальных контейнерах в могильник (в случае открытого цикла), либо на завод радиохимической переработки облученного топлива в случае замкнутого цикла. В процессе переработки отработавшего топлива происходит извлечение урана и плутония, которые снова направляются на завод по изготовлению твэлов.

Принцип комплексного использования сырья еще в 30-х годах обосновал академик А. Е. Ферсман. Помимо основного производства организуются вспомогательные, которые позволяют извлечь из сырья ряд ценных продуктов, причем продукты вспомогательного производства порой бывают даже более ценными, чем основные. Из сырья, используемого для получения меди, можно извлечь 25 элементов, которые относятся к категории ценных. Почти все серебро, висмут, платину, а также более 20% золота и 30% серы получают попутно в результате комплексного использования полезных ископаемых. Основным источником получения германия является зола ТЭЦ и некоторые сульфидные руды.

Вспомним, какой вред приносят кислотные дожди. Во Франции избавились от этого недуга. На всех тепловых электростанциях была поставлена очистительная аппаратура, при помощи которой улавливались сернистые соединения. Затраты значительные, но

и результаты немалые: теперь во Францию не надо завозить серу — она добывается в фильтрах электростанций.

От паровозов на железнодорожном транспорте уже давно отказались, а вот в промышленности ликвидация «паровозов» (т. е. производств, у которых КПД топлив низкий и часть ценных продуктов превращается в аэрозоли) еще не произошла. За год ради получения электроэнергии в нашей стране сжигается более 300 млн тонн угля и образуется при этом порядка 50 млн тонн золы, большая часть которой рассеивается в воздухе. Между тем зола не только готовый строительный материал (из нее можно делать строительные блоки), но содержит много ценных веществ, таких, например, как ванадий.

В некоторых случаях отходы умышленно переводят в аэрозоли. Такой прием, в частности, используют для извлечения из шлама осадка в процессе производства ряда металлов — олова, свинца, цинка и меди. Металлы, находящиеся в шламах медьэлектролитного производства, возгоняются и переводятся в аэрозольное состояние, а затем охлаждаются. В результате образуется высокодисперсная металлическая пыль, которую затем улавливают и получают из бросового шлака необходимые металлы.

Безотходные производства должны предусматривать использование принципиально новых процессов, технологических схем и оборудования для максимального выхода готовой продукции и минимального — отходов. Много ухищрений, например, применяют для снижения пылеобразования в карьерах, угольных шахтах и в процессе вскрышных работ: используют рациональную конструкцию дробильных устройств, осуществляют предварительное увлажнение материала, вводят связующие добавки.

Конверторное производство стали сокращает объем выбросов в атмосферу в десять раз по сравнению с мартеновским, а использование электропечей — еще вдвое. Из этого примера видно, как от технического переоснащения промышленности напрямую зависит чистота воздуха.

Безотходное производство предусматривает, кроме того, замкнутый технологический цикл, что означает очистку газа, а также и воды, извлечение сырья



и возвращение газа (воды) для повторного использования. В клинкерной печи, в которой происходит обжиг сырья и превращение его в цемент, вместе с нагретым газом в виде пыли улетучивается до 10% продукции. Извлечение ее позволяет использовать газ в замкнутом процессе.

Какой же метод очистки газов является предпочтительным? Нельзя допустить, чтобы очистка превратилась в новый источник отходов. Такая нерадостная перспектива имеется у мокрой очистки. От одной доменной печи средней мощности за час может образоваться до 2000 м<sup>3</sup> отработавших вод. Предпочтение явно следует отдать сухой очистке, о чем мы уже говорили.

Начинать очищать воздух надо там, где он подвергается загрязнению, т. е. непосредственно на рабочих местах. Покажем возможности сухой очистки при помощи рукавных фильтров воздуха, который образуется при производстве силикозоопасного асбестового волокна. Разработаны гигантские фильтры, имеющие поверхность с хороший стадион (200 000 м<sup>2</sup>). Фильтры такого масштаба позволяют обеспечить высокую степень очистки (99,999%), а чистый воздух может использоваться для многократной циркуляции.

Зачастую запыленные газы нагреты; после освобождения от аэрозольных загрязнений нагретые газы становятся источником тепла и используются для нужд производства. Соединения серы, улавливаемые на заводах по производству синтетического волокна, растворители в цехах окраски и многие другие продукты вновь возвращаются в производство.

Можно ограничиться, конечно, полумерами, т. е. малоотходным производством. Для одного производства отходов может быть и мало, но когда этих производств много, то малоотходное производство перестает быть таковым.

Возможности безотходных производств определяются сырьем и его местонахождением, особенностью данной отрасли промышленности. Превращение этих возможностей в действительность требует огромных капитальных вложений, организационных усилий и времени. Необходимость полного использования природных ресурсов и охраны окружающей среды делают безотходные производства единственно возможными

уже в недалеком будущем. Аэрозоли в этой поистине глобальной проблеме занимают не последнее место — в современных производствах джинн должен быть закрепощен.

### **ДЖИНН В БУТЫЛКЕ И ВНЕ ЕЕ (ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ)**

Аэрозоли — друзья и враги, полезны и вредны, лечат и калечат, несут живительный дождь и уничтожают посевы, повышают урожайность полей и загрязняют атмосферу — эти и еще многие другие достоинства и недостатки аэрозолей вызваны одним и тем же: раздробленностью дисперсной фазы и газовой дисперсионной средой, окружающей каждую из великого множества частиц.

Аэрозолей-друзей нет необходимости, подобно джинну, загонять в бутылку. Аэрозолям-врагам не следует давать свободу и возможность вырваться из бутылки. Если же такая возможность исключается, то приходится принимать все меры для укрощения строптивого.

Несмотря на то что аэрозолям больше лет, чем Вселенной, наука о них начала развиваться каких-нибудь 75 лет тому назад. Технический прогресс открыл и продолжает открывать все новые сферы, в которые активно вторгаются аэрозоли. В настоящее время можно с полным основанием сказать, что без аэрозолей невозможна не только производственная деятельность людей, но и сама жизнь.

Публикаций по аэрозолям так много, что прочесть их все одному человеку просто невозможно. В каждом номере реферативного журнала «Химия», который издается в нашей стране с периодичностью 24 номера в год, появляются аннотации нескольких десятков публикаций, касающихся аэрозолей.

Попытаемся обобщить основные направления работ по аэрозольной тематике. Можно выделить шесть главных проблем, по которым ведется исследование и которые имеют практическое значение для многочисленных аэрозольных систем. Эти направления следующие:

ликвидация или по крайней мере снижение вредного воздействия аэрозолей и усиление всего полезного, что они могут дать;

разработка более эффективных и совершенных способов получения и разрушения аэрозолей;

использование свойств аэрозолей при охране окружающей среды и создании безотходных производств;

исследование внеземных аэрозолей и связи их с земными;

управление погодой и климатом;

совершенствование существующих и разработка принципиально новых сфер применения аэрозолей в целях научно-технического прогресса.

Неоспоримы достижения современной науки и практики использования аэрозолей. В будущем нас ожидают новые достижения, открытия и свершения, которые позволят больше узнать об аэрозолях и эффективнее использовать их уникальные свойства.

Многие загадки джинна перестали быть таковыми, но еще немало тайн предстоит разгадать, чтобы познать и использовать его поистине безграничные возможности.

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

*Фукс Н. А.* Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 252 с.

Успехи механики аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 156 с.

*Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли — пыли, дымы, туманы: Пер. с англ./Под ред. Н. А. Фукса. Л.: Химия, 1979. 426 с.

*Раст П.* Аэрозоли: Пер. с англ./Под ред. Б. Ф. Садовского. М.: Мир, 1987. 213 с.

*Лебединец В. Н.* Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 272 с.

*Климук П. И., Забелина И. А., Гоголев В. А.* Визуальные наблюдения и загрязнение оптики в Космосе. Л.: Машиностроение, 1983. 223 с.

*Дунский В. Ф.* Пестицидные аэрозоли. М.: Химия, 1982. 287 с.

*Деннис А.* Изменение погоды засевом облаков. М.: Мир, 1983. 272 с.

*Вальдберг А. Ю., Исянов Л. М., Тарат Э. Я.* Технология пылеулавливания. Л.: Химия, 1985. 192 с.

*Башура Г. С. и др.* Фармацевтические аэрозоли. М.: Медицина, 1978. 257 с.

*Амелин А. Г., Яшке Е. В., Калганов Г. А.* Туманы служат человеку. 2-е изд. М.: Наука, 1985. 162 с.

*Зимон А. Д.* Что такое адгезия. М.: Наука, 1983. 176 с.

*Волынский М. С.* Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986. 144 с.

*Зимон А. Д.* Мир частиц (Коллоидная химия для всех) М.: Наука, 1988. 192 с.

*Петрянов-Соколов И. В., Сутугин А. Г.* Аэрозоли. М.: Наука, 1989. 142 с.

Научно-популярное издание

**Зимон** Анатолий Давыдович

**АЭРОЗОЛИ,  
ИЛИ ДЖИНН,  
ВЫРВАВШИЙСЯ  
ИЗ БУТЫЛКИ**

Редактор *Г. Н. Гостеева*

Художник *Б. А. Котляр*

Художественный редактор *К. К. Федоров*

Технические редакторы *Л. Н. Богданова, Е. Н. Крумштейн*

Корректоры *Т. С. Васина, В. А. Лобанова*

ИБ № 3230

Сдано в набор 16.04.92. Подписано в печать 28.09.92.

Формат бумаги 60х88 1/16. Бумага тип. № 2.

Гарн. Литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,74.

Усл. кр.-отт. 12,99. Уч.-изд. л. 10,75. Тираж 8000 экз.

Заказ № **4072** . С. 30.

Ордена "Знак Почета" издательство "Химия". 107076,

Москва, ул. Стромынка, 21, корп. 2.

Диалозитивы изготовлены в ордена Трудового Красного  
Знамени ГП "Техническая книга" Мининформпечати РФ.

198052, г.Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Стпечатано с готовых пленок  
в Московской типографии № 2 ВО „Наука”  
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., д. 6

# ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В 1993 г. в издательстве «Химия» издаются следующие книги серии «Научно-популярная библиотека школьника»:

**О л ь г и н О. Опыты без взрывов.**  
3-е изд.— М.: Химия, 1993 (III кв.).  
12 л. (Научно-популярная б-ка школьника).

ISBN 5-7245-0401-0: 7 р.

Увлечение химией начинается обычно с опытов. Есть множество полезных и просто красивых экспериментов, которые вполне по плечу и юным химикам. Именно такие опыты вы найдете в этой книге. Большинство из них было описано ранее в журнале «Химия и жизнь», в разделе «Клуб „Юный химик“». Опыты подобраны так, чтобы заинтересовать юных читателей, показать им привлекательность химической науки и в то же время привить навыки самостоятельной работы. Название книги выбрано не случайно: все предлагаемые опыты, если ставить их по описанию, безопасны (2-е изд.— 1986 г.).

Книга рассчитана в основном на школьников, однако она может принести пользу и педагогам, особенно в проведении внеклассной работы.

**Леенсон И. А. Почему идут химические реакции.** Пособие для учителей и абитуриентов.— М.: Химия, 1993 (IV кв.) — 7 л.— (Научно-популярная б-ка школьника).

ISBN 5-7245-0884-2: 5 р.

Просто, в доходчивой форме с наглядными примерами изложены основные положения традиционно трудных для понимания и мировоззренчески важных разделов химической школьной программы — химической термодинамики и кинетики, являющихся камнем преткновения на выпускных экзаменах в средней школе и вступительных в вузы. В книге выделены наиболее важные и принципиальные положения, приведены вопросы и задачи для самоконтроля. Пособие является результатом деятельности временного научно-исследовательского коллектива «Школа», одобрено Менделеевской ассоциацией по химическому образованию. И. А. Леенсон — доцент МГУ, член ВНИК «Школа», автор большого числа прекрасных научно-популярных изданий.

Книга, предназначенная для широкого круга читателей, — незаменимое методическое пособие для учителей школ, преподавателей техникумов и ПТУ химического профиля. Может быть полезна для старшеклассников и абитуриентов, поступающих в химические, биологические, медицинские и другие вузы.

**Артамонов В. И. Занимательная биохимия растений.**— М.: Химия, 1993 (III кв.) — 20 л.— (Научно-популярная б-ка школьника).

ISBN 5-7245-0885-0: 10 р.

Растительный мир — это гигантский биохимический комбинат, производящий крахмал и масла, древесину и белки, сахара и витамины, красящие и ароматические вещества, каучук и ценнейшие лекарства, органические кислоты и дубители. Успехи в изучении химического состава растений позволили наладить производство важнейших органических веществ, используемых в питании людей, кормлении животных, медицине, технике, быту. Наука, изучающая химический состав растений, а также происходящие в них превращения, называется биохимией растений. В предлагаемой вниманию читателей книге автор в популярной, увлекательной форме рассказывает об этой науке и ее значении в жизни людей.

Рассчитана на широкий круг читателей.

*Заказы на приобретение книг направляйте в книжные магазины, распространяющие научно-техническую литературу, а также в издательство «Химия» по адресу: 107076, Москва, Стромынка, д. 21, корп. 2, «Реклама».*



# ВНИМАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ!

Издательство «Химия» предлагает  
публикацию в книгах рекламы:

- новых видов продукции предприятий
- машин и оборудования для химической промышленности
- научных разработок в области химии
- новых технологий

Стоимость одной полосы опубликованного рекламного материала 1,5—3 тыс. руб. в зависимости от тиража и вида издания.

*Адрес издательства «Химия»:  
107076, Москва, Стромынка, д. 21,  
корп. 2  
Телефон: 268-58-58 268-29-78*

# **Аэрозоли, или Джинн, вырвавшийся из бутылки**

**КНИГА РАССЧИТАНА НА  
ШИРОКИЙ КРУГ ЧИТАТЕЛЕЙ.**

**В ЗАНИМАТЕЛЬНОЙ ФОРМЕ  
РАССКАЗЫВАЕТСЯ ОБ  
АЭРОЗОЛЯХ – ДИСПЕРСНЫХ  
СИСТЕМАХ.**



**МОСКВА „ХИМИЯ”**