

Министерство здравоохранения Российской Федерации
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Реферат

по дисциплине: «Коллоидная химия»

на тему: «Аэрозоли»

Выполнила:
студентка 3 курса, гр. 304, ФФЗ
Петрова Анна Геннадьевна

Проверил:
д.б.н., доцент
Иванов Иван Иванович

г. Иркутск 2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Определение и классификация аэрозолей.....	4
2 Образование аэрозолей.....	9
3 Морфологические свойства аэрозольных частиц.....	17
4 Элементы механики аэрозолей.....	21
4.1 Скорость падения частиц.....	21
4.2 Броуновское движение и диффузия.....	23
Заключение.....	26
Список литературы.....	27

ВВЕДЕНИЕ

Наука об аэрозолях (раздел коллоидной химии) граничит с физической химией, физикой, химией, с оптикой, метеорологией, сельскохозяйственными и военными дисциплинами, медициной. Для ее успешного развития создаются математические методы исследования, разрабатываются сложнейшие приборы, способные изучать аэрозоли даже на других планетах. От успешного развития учения об аэрозолях зависит решение множества проблем, даже и таких которые определяют возможность дальнейшего существования самой жизни на нашей планете, так как нет ни одной стороны жизни и деятельности человека, которая не зависела бы от аэродисперсных систем.

Однако эта область науки остается малоизвестной. Несмотря на то, что аэрозоли широко распространены в природе и непрерывно образуются в результате человеческой деятельности, научное их исследование началось сравнительно недавно. Во второй половине XIX века несколько крупных физиков и математиков, заинтересовавшихся специфическими свойствами аэродисперсных систем, занялись их изучением. Стокс вывел формулы для сопротивления вязкой среды движению частиц, качественное исследование рассеяния света дисперсными системами, предпринятое Тиндалем, и количественное исследование того же явления, принадлежащее Релею, изучение атмосферных ядер конденсации Айткенем – примеры исследований, послуживших фундаментом дальнейшего исследования физики аэрозолей. Однако в начале 20 века работа в этом направлении замедлилась в связи с возникновением новой физики. Но нужды промышленности, медицины (профилактики и терапии), сельского хозяйства и метеорологии настоятельно требовали изучения различных аспектов аэродисперсных систем. Во время первой и, особенно, второй мировой войны были предприняты обширные исследования химии и физики аэрозолей, в особенности дымовых завес; в результате, за сравнительно короткий срок в этой области были достигнуты большие успехи.

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

В метеорологии больших успехов достигла микрофизика облаков. Изучение атмосферных ядер конденсации и конденсационного роста водяных капелек в атмосфере, а также исследования динамики столкновений и слияния капелек привели к лучшему пониманию процессов образования

атмосферных осадков и возбудившим огромный интерес попыткам искусственного вызывания осадков.

Физика аэрозолей приобрела в настоящее время значение и в изучении космоса, в частности в исследования метеоритной, межпланетарной и галактической пыли.

Издавна ученые отмечали обычную связь легочных расстройств с вдыханием пыли. Ученых интересовали проблемы влияния пыли на органы дыхания. С промышленной революцией 19-го века и с появлением высокоскоростных механизмов чрезвычайно возросла запыленность. Одновременно возросло и число ученых, занимающихся изучением пыли. В 19-м веке аэрозоли занимали важнейшее место в науке, так как их считали мельчайшими элементами вещества. Пониманию свойств аэрозолей способствовали работы многих замечательных ученых – Тиндаль, Листер, Кельвин, Айткен, Эйнштейн. Однако с открытием радиоактивности и развитием квантовой механики ученые в поисках мельчайших частиц Вселенной отошли от изучения аэрозолей, и наука об аэрозолях зачахла. Аэрозоли изучали применительно к профессиональным заболеваниям и эти работы носили прикладной характер. Проблемы связанные с аэрозолями, привлекли внимание широкой научной общественности только после второй мировой войны. Причин возросшего интереса было множество. Во-первых, производство ядерного топлива породило проблему защиты от потенциально опасных для здоровья радиоактивных аэрозолей. Во-вторых с появлением радиолокаторов необходимо было выяснить, как влияют на передаваемый и отраженный сигналы облака и как увеличить или уменьшить это влияние в зависимости от нужд практики. Наконец, угроза химической и биологической войн вынудила покончить с догадками и вплотную заняться фундаментальными исследованиями свойств аэрозолей, так как поражающие вещества находятся именно в аэрозольной форме. В последние годы число исследований аэрозолей значительно возросло. Несколько научных журналов целиком посвящены этим проблемам, а множество других регулярно публикуют статьи по различным аэрозольным аспектам.

Принимая во внимание большое значение аэрозолей, можно подумать, что они постоянно привлекали внимание ученых и что в настоящее время установлены фундаментальные законы поведения аэрозольных частиц. Однако это не так. Наука об аэрозолях только в настоящее время начинает «расцветать» и привлекать к себе заслуженный интерес.

Целью данной работы является изучение определения, классификации аэродисперсных систем, а так же вопросов образования и физических свойств аэрозолей в научной и учебной литературе.

1 Определение и классификация аэрозолей

В окружающей человека среде аэрозоли распространены повсюду. Легкий туман их мельчайших частиц образуется над растениями. Ветер поднимает и разносит облака пыли. при извержении вулканов в атмосферу

выбрасываются плотные клубы дыма. Наконец, человек в своей повседневной деятельности создает всевозможные мельчайшие частицы, которые попадают в воздух. Прежде чем приступить к систематическому рассмотрению частиц, необходимо ввести несколько определений, используемых обычно для характеристики различных аэрозолей.

Учение об аэрозолях выделяется в настоящее время в самостоятельный раздел коллоидной химии. *Аэрозолем* называется дисперсная система, состоящая из газообразной дисперсионной среды и твердой или жидкой дисперсной фазы, иначе говоря, это взвесь твердых или жидких частиц в газе. Но их дисперсность большей частью может быть ниже коллоидной, поэтому их еще называют аэродисперсными системами.

Слово «аэрозоль» греко-латинского происхождения: «аэр» 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». Общий термин «аэрозоль» был предложен профессором Доннаном в конце первой мировой войны для обозначения тонких аэродисперсных систем, таких как ядовитые дымы фенилхлорарсина. Независимо от Доннана этим термином начал пользоваться Шмаусс, которому принадлежит первая статья, где было упомянуто слово аэрозоль.

Особенности аэродисперсных систем. Между аэродисперсными системами (аэрозолями) и гидрозольями существуют глубокие принципиальные отличия. В аэрозолях нет ничего, аналогичного стабилизирующему двойному электрическому слою или явлению пептизации гидрозольей, а так же в газовой среде полностью отсутствует электролитическая диссоциация. Кроме того, для аэрозолей не характерны термодинамические факторы устойчивости, т.к. нельзя создать поверхностный слой на границе с газообразной средой, понижающий поверхностное натяжение до минимума. Еще одним отличительным свойством аэрозолей является их неустойчивость, обусловленная, кроме всего прочего, низкой вязкостью и инертностью среды. Аэрозольная система различается при значительно меньших размерах частиц или их агрегатов, чем лиозоли. Частицы дисперсной фазы аэрозолей быстро оседают под действием силы тяжести, могут исчезать из аэрозоля благодаря как седиментации, так и диффузии к стенкам сосуда и испарению. Броуновское движение и столкновения между частицами, обусловленные различной скоростью седиментации, приводят к образованию агрегатов или более крупных капель, седиментирующих из аэрозоля.

Еще одна особенность аэрозолей – нестабильные и неравновесные электрические свойства их частиц. В аэрозолях частицы могут иметь заряды разного знака, т.к. газообразная среда не может быстро обеспечить равновесие. Заряды на аэрозольных частицах изменяют свойства и устойчивость аэрозолей, поэтому униполярная зарядка частичек аэрозолей в отсутствие стенок, например в атмосферных облаках, может повысить их устойчивость, приблизить к гидрозольям.

Классификация аэродисперсных систем. Свойства аэрозолей определяются природой вещества из которого состоят частицы, природой газовой среды, размером (степенью дисперсности), формой и зарядом частиц, а так же концентрацией аэрозоля по массе (общей массой частиц, содержащихся в единице объема аэрозоля которую измеряют в $\text{кг}/\text{м}^3$, $\text{мг}/\text{м}^3$, $\text{мг}/\text{л}$, $\text{мг}/\text{см}^3$), и счетной (частичной) концентрацией, т.е. числом частиц в единице объема (м^3 , см^3 , л).

Частичная концентрация аэрозолей в воздухе велика и колеблется от 1000 до 100 тысяч частиц в 1 см^2 . Но хотя число частиц в атмосфере велико, но размеры их малы, поэтому суммарная их масса ничтожна и массовая концентрация невелика и обычно колеблется от 0,2 до $20 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Учеными были сделаны попытки классификации аэрозолей на основе их природы, размеров и концентрации частиц, а так же агрегатного состояния.

Диапазон размеров частиц, которые могут образовывать аэрозоли, находится в пределах по крайней мере семи порядков, что сказывается на свойствах аэрозолей. В зависимости от размеров частиц различают три класса аэрозольных систем: высоко-, средне- и грубодисперсные.

Высокодисперсные системы имеют размер частиц от 0,001 мкм до 0,1 мкм. Самые мельчайшие аэрозольные частицы формируются обычно из 20-30 молекул и имеют размер около 0,001 мкм или 1 нм, который часто принимают за минимальный размер аэрозольных частиц. Такие системы слабо устойчивы, вследствие частых столкновений частиц между собой и со стенками (в замкнутой системе). Частицы высокодисперсных систем служат ядрами конденсации паров в облаках, обуславливают синеву неба.

Среднедисперсные системы имеют размер частиц от 0,1 до 10 мкм. Это наиболее устойчивые системы.

Грубодисперсные системы имеют размер частиц более 10 мкм. Такие системы неустойчивы в связи с большой скоростью седиментации (при малой вязкости среды) и видны невооруженным глазом.

Плотность дисперсной фазы в аэрозолях имеет очень важное значение как для понимания сущности физических явлений в них, так и при построении физико-математических моделей аэродисперсных систем. Системы с малой массовой концентрацией частиц (менее нескольких граммов на кубометр газа) иногда называют аэрозолями, а системы с высокой массовой концентрацией – *аэровзвесьми*. Природные атмосферные аэрозоли практически всегда характеризуются первым признаком, это достаточно разбавленные системы. Технологические пылегазовые потоки зачастую необходимо относить к аэровзвесьям.

По характеру образования различают дисперсионные и конденсационные аэрозоли. *Дисперсионные* аэрозоли образуются при измельчении твердых тел или распылении жидкостей. Отличаются большим размером частиц, более широким диапазоном размеров твердой дисперсной фазы, обычно состоят из отдельных или слабо агрегированных частиц неправильной формы.

Конденсационные аэрозоли появляются при конденсации отдельных частиц в агрегаты. Конденсационные аэрозоли ближе к монодисперсным, их частицы имеют правильную форму (обычно шарообразную); для твердой дисперсной фазы характерно наличие быстро образующихся рыхлых агрегатов, состоящих из большого числа первичных частиц. Конденсационным способом возникают аэрозоли водных осадков и сублимирующих солей (NH_4Cl , AgI). К числу конденсационных относятся аэрозоли, образующиеся при затвердевании жидких конденсационных продуктов (ZnO , град), при конденсации паров металлов и в результате газовых реакций, ведущих к образованию нелетучих продуктов.

Согласно другой классификации аэрозоли делят на три большие класса – *пыли, дымы и туманы*. Остальные аэрозоли являются производными этих классов или промежуточными. И особый класс образуют аэрозоли.

Аэрозоли, дисперсная фаза которых состоит из твердых частиц являются наиболее простыми. Обычно средне- и высокодисперсные системы типа Т/Г называются дымом, а грубодисперсные – пылью.

Таблица 1- Классификация аэрозолей

Дисперсная фаза	Обозначение	Название
Твердая	Т/Г	Дым (диспергационный аэрозоль), пыль (конденсационный аэрозоль)
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 (соединения включения)
Твердая	Т/	аэрозоли

Пыли представляют собой дисперсионные аэрозоли Т/Г и состоят из твердых частиц, диспергированных в газообразной среде в результате механического измельчения твердых тел (как, например, пыль, образующаяся при дроблении и тонком измельчении горных пород и минералов, при бурении и взрывных работах) или под действием аэродинамических сил (например, воздушной струи) на порошкообразные материалы. Осадок из крупных частиц так же называют пылью, но точнее пылью следует считать не аэрозоль как таковой, а его дисперсную фазу, то есть осадок твердых частиц на различных поверхностях, легко переходящий обратно во взвешенное состояние. Поэтому аэрозоли из частиц пыли правильнее называть пылевым облаком. В большинстве случаев пыли – это полидисперсные малоустойчивые системы, они содержат больше крупных частиц, чем дымы и туманы. Счетная или частичная концентрация (число частиц в 1см^3 или м^3) в пылях обычно мала по сравнению с дымами и туманами.

Пыль в атмосфере образуется при ветровой эрозии почвы и состоит, в основном, из кварца и полевого шпата. Пыль может быть биологического происхождения и состоять из мелких организмов, сухих остатков водорослей, чешуек, волос, перьев и других частичек растений и животных. Установлено, что небольшая часть атмосферных аэрозолей (10 -6%) состоит из вирусов, бактерий, спор, пыльцы растений и др. Эту фракцию аэрозолей называют аэропланктоном. Доля аэропланктона в общем балансе аэрозолей атмосферы ничтожна, но он обеспечивает размножение растений и грибов, вызывает болезни людей, животных и человека.

К дымам относят разнообразную группу конденсационных аэродисперсных систем типа Т/Г, состоящих из частиц с малой упругостью пара и с малой скоростью седиментации под действием силы тяжести. Раньше дымами называли лишь аэрозоли, образующиеся при горении и деструктивной перегонке. Однако в настоящее время термин «дым» включает многие другие аэродисперсные системы, которые нельзя отнести ни к пылям, ни к туманам, так, например, аэрозоли, образующиеся при возгонке и конденсации паров, а так же в результате химических и фотохимических реакций. К типичным представителям дымов следует отнести аэрозоли, образующиеся при конденсации паров стеариновой кислоты, при взаимодействии газообразных аммиака и хлороводорода, при фотохимическом разложении паров пентакарбонила железа с образованием дыма оксида железа, при окислении паров металлов в электрической дуге. Важным критерием является размер частиц, поэтому даже аэрозоль, образующийся при распылении какого-нибудь раствора и высыхании капелек, следует называть дымом, если образующиеся частицы достаточно малы. Величина частиц в дымах лежит в пределах от 5 мкм до субмикроскопических размеров, т.е. менее 0,1 мкм.

Средне- и высокодисперсные системы типа Ж/Г относят к туманам. Туманы состоят из капелек жидкости, образующихся при конденсации пара и распылении жидкости. При этом в капельках могут содержаться растворенные вещества или суспензированные твердые частицы. Туманы, в особенности природные, состоят из сравнительно крупных капелек диаметром до 10 мкм и выше, и счетная концентрация их обычно невелика. Характерным признаком, отличающим туманы от дымов, служит размер частиц. Капельки и частицы различных атмосферных загрязнений и пыли образуют в атмосфере дымку, представляющую собой комбинацию из трех основных классов аэрозолей, а не особый класс.

Аэрозоли типа Т, Ж/Г, дисперсная фаза которых одновременно состоит из жидких и твердых частиц, называют смогом. Такие системы являются одновременно дымом, туманом и пылью, т.е. системами смешанного типа. Смог образуется в задымленной атмосфере крупных городов и промышленных центров в результате конденсации влаги на частицах сажи, пепла продуктов сухой перегонки топлива, т.е. на газовых выбросах из заводских и печных труб различных промышленных предприятий, а так же выбросах транспорта.

Существуют и другие аэрозольные системы, менее распространенные, но не менее важные. Например, аэрозольные пены – жидкие (система Ж, Г/Г) и твердые (система Т, Г/Г). Жидкие аэрозольные пены, в которых дисперсную фазу составляют пузырьки газа, разделенные тонкой прослойкой жидкости (пузырьки в воздухе) применяют для тушения пожаров. Примером твердых пен может служить пепел, извергаемый вулканами, он состоит из твердых частиц, поры которых заполнены газом.

Особый тип аэрозолей существует в безгазовом космическом межпланетном пространстве. Здесь космическая пыль и метеоритные частицы образуют новый тип дисперсных систем газовой среды, которые называют астрозолями, то есть системами, в которых имеется граница раздела со стороны твердого тела. При вхождении в плотные слои воздуха, например, на высоте 100 км от Земли, частицы опять попадают в достаточно плотную газовую среду и превращаются в аэрозоли.

Дисперсная система типа Г/Г, которая в определенных условиях может образовывать аэрозоли. В газовой среде при определенных условиях возникают своеобразные химические соединения (гетерогенные образования), относящиеся к классу так называемых клатратов, образующиеся из-за отклонений плотности в гомогенной газовой среде (например, среда, состоящая из водорода и аммиака при низких температурах и высоких давлениях).

Рассмотренное выше деление аэрозолей в зависимости от их дисперсности, характера возникновения и фазового состояния является делением аэродисперсных систем по особенностям физико-химического характера. Очевидно, классификация аэрозолей возможна и по другим признакам, например: гигиеническая (по биологическому воздействию), метеорологическая (по образованию и распределению аэрозолей в атмосфере), техническая (по промышленным отраслям, где они возникают). В зависимости от того, возникают ли аэрозоли в природных условиях естественным путем, или их появление есть результат работы промышленных предприятий, аэрозоли могут быть подразделены на естественные и искусственные, или промышленные. И, наконец, признаки, по которым иногда также производится деление аэрозолей, - электрический заряд и радиоактивность. Аэрозоли с частицами, несущими электрический заряд, называют в ряде случаев электроаэрозолями, а под радиоактивными понимают аэрозоли, содержащие частицы, полностью или частично состоящие из радиоактивного вещества.

2 Образование аэрозолей

Согласно классификации, применяемой ко всем дисперсным системам, рассмотрим два основных способа образования аэрозолей: *конденсационный*, в котором частицы коллоидных размеров образуются путем агрегации молекул, и *дисперсионный*, в котором мелкие частицы образуются путем дробления вещества.

Образование аэрозолей при конденсации.

Конденсация паров — наиболее распространенный способ образования аэрозолей. Пар высокой концентрации, находящийся в воздухе или инертном газе, охлаждается при разбавлении его холодным воздухом или быстром расширении до тех пор, пока не станет пересыщенным и не начнет конденсироваться, образуя аэрозоль из жидких или твердых частиц. Примером образования конденсационных аэрозолей может служить возникновение облаков при подъеме теплого влажного воздуха в холодные верхние слои атмосферы. В лаборатории получают конденсационные аэрозоли путем возгонки многих неорганических и органических веществ. В большинстве случаев процесс, приводящий к пересыщению, например, смешение холодного и теплого воздуха в атмосфере или расширение и охлаждение газообразных продуктов горения, происходит одновременно с конденсацией, и степень пересыщения в различных точках системы в любой момент неодинакова. Пар может конденсироваться на стенках сосуда, на частицах пыли или атмосферных ядрах конденсации, на ионах, содержащихся в паре или нейтральном газе, на полярных молекулах, например серной кислоты, а при очень большом пересыщении — на молекулах или молекулярных агрегатах самого пара. Для конденсации на каждом типе этих ядер требуется различная степень пересыщения.

Коагуляция, непрерывно происходящая в аэрозоле с самого начала конденсации (если не принять особых мер для ее подавления), значительно усложняет процесс. Поэтому нет ничего удивительного в том, что прямых данных о самых ранних стадиях образования частиц очень мало. Для точного определения условий конденсации пересыщенного пара необходимо наличие определенной степени пересыщения, одинаковой во всем объеме системы. При этом пересыщение не должно уменьшаться за счет диффузии пара к стенкам сосуда. Такие условия недостижимы на практике, но в камере Вильсона, сконструированной в 1897 году специально для этой цели, они выполняются достаточно хорошо. Многие исследователи вслед за Вильсоном определили визуальным методом степень пересыщения, необходимую для начала спонтанной конденсации различных паров, а также для конденсации на ядрах различных типов.

Спонтанная конденсация пересыщенного пара.

Рассмотрим каплю радиуса r из жидкости с молекулярным весом M , плотностью ρ и поверхностным натяжением γ . Предположим, что капля окружена паром с парциальным давлением p , а равновесное давление пара над плоской поверхностью жидкости равно p_∞ . Отношение p/p_∞ называется пересыщением. Согласно известному уравнению Томсона — Гиббса, капля находится в равновесии с паром, если

$$\ln \frac{p}{p_\infty} = \frac{2\gamma M}{RT\rho r} \quad (2.1)$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Ла Мер и Грин экспериментально подтвердили применимость этого уравнения для капель радиусом 0,08—1,0 мк.

Для каждой степени пересыщения существует определенный критический радиус $r_{кр}$. Более мелкие капли испаряются, а более крупные — растут. Конденсация может происходить только тогда, когда в паре присутствуют ядра, радиус которых больше определяемого уравнением. Был сделан вывод, что ядрами конденсации являются зародыши определяемого уравнением (2.1) размера, представляющие собой молекулярные агрегаты, образующиеся при флуктуациях концентрации пара. Большинство этих агрегатов снова распадается, но некоторые продолжают расти и превращаются в ядра конденсации критической величины.

Образование аэрозолей на посторонних частицах

– нерастворимые ядра

Если в паре присутствуют твердые посторонние частицы, поверхность которых смачивается конденсирующейся жидкостью, это облегчает конденсацию. Проще всего объяснить это явление тем, что на поверхности частиц адсорбируется тонкая пленка пара. Поэтому в дальнейшем частицы ведут себя как капельки той же величины, и критическое пересыщение зависит от размеров частиц согласно уравнению Томсона-Гиббса. Но это объяснение правильно лишь отчасти: если бы размер посторонних частиц был единственным фактором, определяющим их свойства в качестве ядер конденсации, то пар мог бы конденсироваться и без таких частиц, и в отсутствие заметного пересыщения на стенках сосуда, поскольку стенки можно считать практически плоскими ($r = \infty$).

Из фольмеровской теории конденсации на плоской поверхности следует, что критическое пересыщение (для определенной скорости образования капелек) должно возрасти с увеличением краевого угла, образуемого жидкостью на данной поверхности. В дальнейшем Флетчер доказал, что частицы могут быть эффективными ядрами конденсации лишь в том случае, если они не только достаточно велики, но и в достаточной степени смачиваемы.

Важна также структура поверхности. Крупные ямки и выступы на гладкой поверхности будут снижать критическое пересыщение, а очень мелкомасштабные неоднородности, такие как сдвиги решеток на поверхностях кристаллов, могут служить местами предпочтительной конденсации, но, вероятно, не могут заметно изменить величину критического пересыщения. Вещество с хорошими льдообразующими свойствами должно, кроме того, обладать незначительным поверхностным зарядом и небольшой гидрофобностью, то есть вода должна давать умеренный краевой угол на веществе.

– растворимые ядра

Если ядра состоят из вещества, растворяющегося в конденсирующейся жидкости, то давление пара этой жидкости понижается, а следовательно, уменьшается и пересыщение, необходимое для начала конденсации. Если раствор и чистый растворитель имеют одинаковую кривизну поверхности, то

давление пара над раствором меньше на величину δp , которая определяется по уравнению:

$$\frac{\delta p}{p} = CN \quad (2.2)$$

где N — число молей растворенного вещества на 1000 г раствора, а C — величина, зависящая от природы растворяемого вещества и почти не зависящая от его концентрации.

Если в капле радиусом r и плотностью ρ содержится m граммов растворенного вещества с молекулярным весом M , то

$$N = \frac{1000 \frac{m}{M}}{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho} = 750 \frac{m}{\pi r^3 \rho M} \quad (2.3)$$

и следовательно,

$$\frac{\delta p}{p} = \frac{750mC}{\pi r^3 \rho M} \quad (2.4)$$

Тогда условие равновесия давления пара над поверхностью капли может быть записано в виде:

$$\frac{p}{p_\infty} = \exp\left(\frac{2\gamma M}{RT\rho r}\right) - \frac{750mC}{\pi r^3 \rho M} \quad (2.5)$$

Это уравнение является основным для конденсации паров воды на ядрах конденсации в атмосфере.

Образование аэрозолей при смешении газовых потоков, содержащих пары и имеющих разную температуру.

Аэрозоли нередко образуются в природе, в лабораториях и в промышленности путем смешения двух потоков газа, содержащих пар вещества и настолько различающихся по температуре, что при их смешении создается пересыщение. В простом случае полного смешения данных объемов двух газов температура и концентрация пара в образующейся смеси и степень пересыщения могут быть рассчитаны по уравнениям теплового и материального балансов.

Если p_1 и p_2 — парциальные давления пара в обоих газах, n — отношение молярных концентраций обоих газов в смеси, а p и T — парциальное давление пара в смеси и ее абсолютная температура, то степень пересыщения S может быть рассчитана по уравнению:

$$S = \frac{p}{p_{нас}} = \frac{p_1 + p_2 n}{(1+n)p_{нас}} = \frac{p_1 + p_2 n}{(1+n) \exp\left(A - \frac{B}{T}\right)} \quad (2.6)$$

где $\exp\left(A - \frac{B}{T}\right)$ — выражение Клаузиуса для давления насыщенного пара $p_{нас}$. Значение T определяется из аналогичного уравнения:

$$T = \frac{T_1 + T_2 bn}{1 + bn} \quad (2.7)$$

Где b — отношение молярных удельных теплоемкостей обоих газов.

Получение аэрозолей путем химического взаимодействия в газовой фазе

Некоторые газы и пары взаимодействуют друг с другом с образованием продуктов, имеющих при обычных температурах низкое давление пара. Так образуется дым NH_4Cl при взаимодействии HCl и NH_3 или туман H_2SO_4 при взаимодействии паров SO_3 и воды. Поскольку газы состоят из свободных молекул, то и реакция должна происходить между последними, и только что возникший продукт реакции также должен находиться в виде свободных молекул. Из них путем агрегации и конденсации образуются очень мелкие жидкие или твердые первичные частицы, скорость возникновения которых определяется степенью пересыщения продукта реакции. Таким образом, образование тумана или дыма при химическом взаимодействии газообразных веществ является по существу конденсационным процессом.

При получении гигроскопичных аэрозолей конденсация начинается с взаимодействия пара вещества с атмосферной влагой. При этом образуются гигроскопичные ядра, на которых вода продолжает конденсироваться до тех пор, пока давление пара образованного таким образом раствора не придет в равновесие с парциальным давлением водяного пара в атмосфере. Тепло, выделяющееся в ходе экзотермичных реакций и разбавления растворов, рассеивается, а благодаря весьма малой величине первичных частиц быстро устанавливается химическое и физическое равновесие. На самой ранней стадии процесса увеличение весовой концентрации аэрозолей, например при возрастании относительной влажности воздуха, приводит не к укрупнению отдельных частиц, а к увеличению их числа. Однако спустя очень короткое время основным фактором, определяющим размер частиц, становится коагуляция, скорость которой пропорциональна квадрату числа частиц в единице объема и поэтому тем больше, чем выше весовая концентрация аэрозоля.

Образование аэрозолей при горении

Основной механизм образования дыма при горении также заключается в конденсации пара, но вследствие высоких температур и быстрого протекания процесса проанализировать его детально невозможно. В зоне реакции молекулы сталкиваются между собой, образуя ядра, из которых путем захвата других молекул вырастают первичные частицы. Можно различить два типа таких частиц: а) кристаллические первичные частицы, образующиеся в том случае, когда отношение энергии активации диффузии молекул к фактору kT достаточно мало и возможна перегруппировка молекул

в кристаллическую форму, и б) аморфные первичные частицы, образующиеся в условиях, когда это отношение слишком велико, чтобы допустить такую перегруппировку. Первичные частицы, возникающие при сжигании полоски магния на воздухе, имеют почти идеальную кубическую форму кристаллов окиси магния. В оптическом микроскопе они не видны, но легко различимы в электронном микроскопе. С другой стороны, первичные частицы сажи, как показывает электронная микрофотография, имеют почти сферическую форму и аморфное строение. Но в любом случае, после того как частицы покинут зону реакции, начинается коагуляция и образование агрегатов. Например, частицы сажи, получающиеся при неполном сгорании, образуют длинные цепочки. При сжигании различных видов топлив возникают сложные аэрозоли.

Получение аэрозолей путем диспергирования жидкостей

В описанных выше конденсационных методах получения аэрозолей коллоидно-дисперсная фаза возникала из молекулярно-дисперсной (газообразной) фазы. В диспергационных же методах происходит разделение сравнительно больших объемов твердых или жидких тел на частицы коллоидных размеров. Сообщаемая жидкости энергия заставляет ее принять неустойчивую форму и распадаться на капли; твердое тело диспергируется на мелкие частицы. Процесс распыления жидкостей интенсивно исследовался в связи с конструированием и эксплуатацией форсунок, широко используемых в промышленности, однако физические его основы еще не вполне выяснены и механизм распыления еще не поддается дальнейшего применения аэрозолей в промышленности, медицине и сельском хозяйстве.

При распылении жидкостей энергия главным образом затрачивается на: а) образование новой поверхности, б) преодоление сил вязкости при изменении формы жидкости и в) потери, обусловленные неэффективной передачей энергии жидкости. Энергия, необходимая для образования новой поверхности при разделении жидкости на капли радиусом r , равна $3\gamma/r\rho$ на 1 г. Для капель воды диаметром 1 мк это составляет 0,43 Дж. Кроме того, требуется еще некоторое добавочное количество энергии, обусловленное тем обстоятельством, что создаваемая в процессе распыления жидкости поверхность больше конечной поверхности образовавшихся капель. Процесс образования капель протекает очень быстро, порой в течение нескольких микросекунд. При этом скорость деформации жидкости очень велика и количество энергии, затрачиваемой на преодоление сил вязкости, должно быть значительным. Если предположить, что вязкая жидкость вытягивается в тонкую нитку или пленку, которая распадается затем под действием поверхностного натяжения, образуя капли со средним диаметром равным толщине нити, то можно рассчитать минимальную работу, необходимую для изменения формы жидкости. По Монку, это можно сделать, приняв, что жидкость входит в широкий конец конической переходной области, равномерно ускоряется в ней и покидает ее в виде нити. Минимальная энергия, рассеиваемая в единице объема жидкости, равна

$$W = \frac{8\eta d_1^2 R}{3\pi d_2^2 L} \quad (2.8)$$

здесь d_1 и d_2 — диаметры начала и конца конической переходной области; L — ее длина; R — объемная скорость течения жидкости; η — вязкость.

Методы распыления жидкостей

Применяемые при получении туманов диспергационными методами распылители жидкостей можно разделить на три основные группы.

К *первой*, имеющей особенное значение для тонкого распыления жидкостей, относятся пневматические или аэродинамические распылители, в которых вытекающая из сопла жидкость дробится движущимся с большой скоростью воздухом или иным газом. С этим методом распыления мы встречаемся в обычных краскораспылительных пистолетах, форсунках Вентури и многочисленных распылителях, служащих для получения инсектицидных, дезинфицирующих и лекарственных туманов. Для этих распылителей характерен очень широкий диапазон размеров капель, который в некоторых случаях можно сузить, улавливая более крупные капли в самом распылителе.

В распылителях *второй* группы жидкость подается на центр вращающегося диска или опрокинутого конуса и сбрасывается в распыленном состоянии с его краев под действием центробежных сил. Получаемый при этом туман характеризуется значительно большей монодисперсностью, чем при других методах распыления жидкостей.

В *третьем*, гидравлическом или гидродинамическом, методе жидкость продавливается под большим давлением через сопло. Здесь дисперсность получаемых капелек в большей степени зависит от физических свойств жидкости и условий ее течения через сопло, чем от взаимодействия между жидкостью и окружающим газом. По-видимому, наиболее удачным распылителем гидравлического типа и, пожалуй, единственным, нашедшим применение для тонкого распыления жидкостей, является центробежная форсунка с вихревой камерой, применяющаяся в сельскохозяйственных опрыскивателях, при распылении жидкого топлива и в двигателях внутреннего сгорания. Здесь жидкость вводится в камеру, закручивается в ней и выпускается через небольшое центральное отверстие.

Помимо этих трех главных типов имеются еще два менее известных типа распылителей специального назначения. Это — распылители, диспергирующие жидкость при помощи электростатических сил, и акустические распылители, в которых распыление происходит под действием высокоинтенсивных звуковых или ультразвуковых колебаний.

Образование аэрозолей путем диспергирования твердых тел и распыления порошков

Аэрозоли, которые мы условились называть пылями, образуются либо путем диспергирования твердых тел, либо путем распыления порошков. Примерами первой группы могут служить пыли, образующиеся при

измельчении горных пород и минералов путем дробления, размола, бурения и взрыва. Ко второй группе следует отнести характерные для пустынь природные атмосферные пылевые облака, а также аэрозоли, искусственно создаваемые человеком из инсектицидных порошков.

Твердое тело можно механически измельчить, прилагая к нему срезающие и растягивающие усилия, которые разрушают его путем раскалывания или растрескивания по плоскостям спайности. В некоторых минеральных пылях можно обнаружить два класса частиц: небольшие осколки материала и мелкие частицы, отрывающиеся от только что возникающих поверхностей вследствие образования микротрещин. При механическом измельчении невозможно получить частицы, размер которых меньше некоторого минимального. После достаточно продолжительного измельчения материала дальнейшие усилия уже не изменят распределения частиц полученного порошка по размерам. Возможно, некоторые из образующихся при тонком измельчении частиц, вновь соединяются друг с другом и с более крупными частицами с той же скоростью, с какой они образуются, и таким образом устанавливается некое динамическое равновесие

Ударные волны, создаваемые с помощью взрывчатых веществ, казалось бы, должны особенно эффективно дробить твердые тела на мельчайшие частицы, однако в действительности размеры частиц в пылях, образующихся при детонации взрывчатых веществ, помещенных внутри горной породы или на ее поверхности, мало отличаются от размеров частиц, образующихся при обычном измельчении тел. Правда, в пыли, образующейся при взрывных работах в шахтах, присутствует значительное число очень мелких частиц, но из электронномикроскопических снимков видно, что они имеют сферическую форму, и это наводит на мысль, что многие из них представляют собой частицы дыма, образовавшиеся из самого взрывчатого вещества. Хотя при взрывах осколков образуется больше, чем при обычном измельчении, однако размеры мельчайших частиц близки к размерам частиц промышленных пылей. Образование аэрозолей возможно также в результате взрывоподобного разрушения твердых тел выделяющимися внутри них газами. Невероятно большое количество тонкодисперсной пыли, выбрасываемой в атмосферу при некоторых извержениях вулканов, видимо, образуется именно этим путем. При выходе магмы, насыщенной парами и газами при высоких давлениях в глубине земли, на поверхность давление внезапно сбрасывается — и она взрывается с огромной силой.

Частицы многих пылей и тонких порошков легко агрегируют. Поэтому, хотя и возможно создать облако пыли, продувая воздух через порошок, большинство взвешенных частиц будет представлять собой агрегаты (если только не приняты специальные меры для их дезагрегации). Адгезия мелких частиц друг к другу и к гладким твердым поверхностям частично объясняется действием сил Лондона — Ван-дер-Ваальса, то есть слабых аттракционных сил, действующих между любыми молекулами. Хотя эти

силы очень малы и убывают пропорционально 7-ой степени расстояния между молекулами, адгезия между двумя мелкими частицами (содержащими миллионы молекул) может иметь заметную величину. Порядок величины силы адгезии можно определить, интегрируя молекулярные аттракционные силы по всем взаимодействующим парам молекул в обеих частицах. Таким путем было найдено, что сила адгезии между двумя твердыми шариками с диаметрами d_1 и d_2 равна:

$$F = \frac{A}{12x^2} \cdot \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \text{дин} \quad (2.9)$$

где x — величина зазора между шариками, а A — постоянная, теоретически равная $\sim 10^{-13}$ эрг. Для анизометрических частиц аналогичные расчеты были выполнены Волдом. Согласно уравнению, сила, действующая между двумя шариками диаметром 0,5 мк при величине зазора между ними 5 Å, равна $8 \cdot 10^{-5}$ дин. Следует иметь в виду, что теория Лондона неприменима при расстояниях между частицами более 100 Å, когда необходимо принимать во внимание эффект электромагнитного запаздывания. Прямое экспериментальное измерение величины адгезии весьма затруднительно, однако некоторым исследователям все же удалось измерить молекулярное притяжение между макроскопическими телами — плоскими кварцевыми пластинами и между пластиной и сферой. Результаты этих исследований, в общем, подтверждают существование эффекта запаздывания ван-дер-ваальсовых сил и хорошо согласуются с расчетами, основанными на теории Лифшица и на объемных свойствах материала (проводимости, диэлектрической постоянной). Выведенная Лифшицем формула дает, естественно, лишь порядок величины притяжения между частицами в порошке, так как на практике серьезные коррективы вносит неправильная форма частиц.

О характере соприкосновения частиц в пылях и порошках известно еще очень мало. Иногда принимают, что равновесное расстояние между частицами равно нескольким ангстремам, но недостаток сведений о субмикронной структуре и величине молекулярной шероховатости поверхности частицы препятствует надежной оценке величины зазора между соприкасающимися частицами. Роль молекулярных сил возрастает с уменьшением размера частиц. Если что x в формуле (2.9) постоянно, то сила F пропорциональна d ; силы же, стремящиеся разделить частицы, обычно пропорциональны d^3 (при колебаниях) или d^2 (аэродинамические силы). Отсюда следует, что мелкие частицы труднее отделить друг от друга, чем крупные.

Формула (2.9) относится к адгезии между чистыми сухими сферическими частицами, а также между ними и гладкими сухими и чистыми поверхностями. На практике, однако, действуют и другие силы. Если частицы покрыты пленкой жидкости, то между ними возникают дополнительные силы, обусловленные капиллярными эффектами, и очень часто адгезия в порошках вызвана в основном сконденсированной на

поверхности частиц влагой. Это подтверждается тем фактом, что в некоторых порошках адгезию можно сильно понизить, покрыв частицы тонким гидрофобным слоем.

Частицы распыленного в воздухе порошка заряжены, и в некоторых случаях заряды также способствуют образованию агрегатов. Чем крупнее частицы, тем выше в среднем их заряд, причем поверхностная плотность — порядка нескольких элементарных зарядов на квадратный микрон поверхности частицы. Чтобы ясно представить себе величину зарядов, достаточно учесть, что электростатическая сила, действующая между двумя соприкасающимися частицами размером в 0,5 мк, несущими лишь по одному элементарному заряду, значительно больше, чем сила молекулярного притяжения.

3 Морфологические свойства аэрозольных частиц

Размер аэрозольных частиц.

Нижняя граница размеров частиц аэрозоля составляет величину порядка 10^{-7} см и относится к области молекулярных размеров (1-5 мк), вернее размеров молекулярных агрегатов. Такие молекулярные агрегаты образуются путем присоединения нейтральных молекул газа к ионам.

Под действием ионизирующего излучения на молекулы воздуха происходит отрыв электрона от оболочки нейтрально атома или молекулы и образовании положительного иона. Электрон соединяется с каким-либо нейтральным атомом или молекулой, в результате чего возникает отрицательно заряженный ион. Образованные таким образом ионы при определенных условиях становятся центрами, вокруг которых группируются нейтральные молекулы воздуха, образуя молекулярные агрегаты (комплексные ионы). Такие молекулярные агрегаты небольших размеров, несущие единичный элементарный заряд, названы легкими ионами и имеют размер порядка $10^{-8} - 10^{-7}$ см. Ионизация атмосферного воздуха вызывается в основном действием излучения радиоактивных элементов, содержащихся в земной коре и находящихся в самом воздухе, и в меньшей степени — космическим излучением.

В результате соединения легких ионов с молекулами газа и с твердыми или жидкими микроскопическими частицами образуются средние и тяжелые ионы. Легкие и средние ионы представляют собой молекулярные агрегаты, состоящие из центральной молекулы и удерживаемой вокруг нее электростатическими и молекулярными силами оболочки из нейтральных молекул. В дальнейшем могут возникать тяжелые ионы, но лишь в тех газах, в которых диспергированы твердые и жидкие частицы. Средние ионы присутствуют также в продуктах сгорания светильного газа и в парах некоторых органических соединений.

Аэрозольные частицы коллоидных размеров (от 5 до 500 мк) далеко не всегда являются носителями электрического заряда. Поскольку частицы таких размеров часто играют роль центров конденсации при образовании

жидких аэрозольных частиц из пересыщенного водяного пара, их тоже называют ядрами конденсации. В соответствии с механизмом возникновения ядра конденсации могут быть разделены на три вида:

А) первичные ядра, то есть ядра конденсации, образующиеся путем слияния нескольких молекул воздуха;

Б) стабильные ядра, которые возникают из твердых веществ и из растворов солей;

В) смешанные ядра, возникающие в результате столкновения первичных ядер со стабильными.

Переходя к вопросу о верхней границе размеров аэрозольных частиц, заметим, что она лежит в области частиц, имеющих размеры около 10 мк. Если нижняя граница определяется минимально возможным размером элементарной ячейки кристаллической решетки, то критерием для определения верхней границы служит скорость седиментации частиц в гравитационном поле. Поскольку частицы, имеющие размеры более 10 мк, оседают со скоростью, превышающей 1 см/сек, их концентрация и взаимодействие с трудом поддаются исследованиям, так как в наблюдаемом объеме газа частицы находятся в течение очень короткого времени.

Наличие широкого спектра размеров аэрозольных частиц приводит к тому, что для различных его областей либо изменяется характер действия законов, либо действуют совершенно разные законы. Особенно наглядно это видно на примере закона сопротивления газообразной среды движению аэрозольных частиц. Для очень мелких частиц ($r < 10^{-6}$ см) сопротивление среды пропорционально скорости и квадрату радиуса частиц. В интервале размеров $10^{-6} - 10^{-4}$ см происходит постепенный переход к закону Стокса, то есть сопротивление среды остается пропорциональным скорости, а квадратичная зависимость от радиуса сменяется на линейную. При дальнейшем увеличении радиуса наблюдается отклонение от закона Стокса. При очень малых скоростях пропорциональность сопротивления и скорости нарушается, а при больших скоростях и размерах частиц сопротивление среды в первом приближении пропорционально квадрату радиуса и квадрату скорости.

Дисперсность аэрозольных частиц

Для характеристики аэрозольного облака и его свойств очень важно знать, как распределяется огромное множество частиц по размерам. В аэрозольном облаке могут присутствовать частицы всех размеров. И по тому, представлены ли в таком облаке частицы лишь одного размера или частицы разных размеров, различают аэрозоли монодисперсные (с частицами одинаковых размеров) и полидисперсные (с частицами разных размеров). Полидисперсные являются более распространенными чем монодисперсные. Макрофизические свойства полидисперсного аэрозольного облака в целом определяются в первую очередь средним размером частиц, представленностью частиц, отдельных размеров, а так же шириной всего спектра размеров. Поэтому для полидисперсных аэрозолей очень важно установить распределение размеров частиц. Современные методы

исследования позволяют экспериментально определить кривые распределения размеров частиц, так как с помощью электронного микроскопа можно наблюдать частицы с радиусами больше $(1-2) \cdot 10^{-7}$ см

Распределение размеров аэрозольных частиц может быть выражено несколькими способами.

1. Счетное распределение – построение дифференциальной кривой дисперсности, или дифференциальной кривой распределения по числу частиц

2. Весовое распределение - построение дифференциальной кривой весового распределения.

3. Связь между дифференциальными кривыми счетного и весового распределения размеров. Связь между функциями $f(r)$ и $g(r)$ задается равенством:

$$g(r) = \frac{m_r}{m} f(r) \quad (3.1)$$

4. Интегральные кривые распределения размеров по числу и весу частиц. На практике часто вместо дифференциальных кривых пользуются интегральными кривыми распределения, показывающими, какая доля частиц (по числу и по весу) имеет радиус больше или меньше данной величины r .

Ввиду сложности процессов образования аэрозолей, как конденсационных, так и дисперсионных, очень трудно вывести теоретические формулы функций распределения аэрозольных частиц. Тем не менее получен ряд эмпирических формул. Наиболее часто применяются формулы Роллера, Розина-Раммлера и Хикиямы-Танасавы. Используются так же кривые распределения Гаусса.

Средние радиусы аэрозольных частиц. Многие параметры аэрозолей, например коэффициент диффузии, ширина линий рентгеновского спектра, полученного методом Дебая-Шеррера, величина поверхности частиц и т.д. зависят от размеров частиц. В литературе уже был предложен ряд различных определений средних радиусов. Наиболее важными из них являются средний арифметический, средний квадратичный, средний кубический радиус, радиус Саутера, средний геометрический радиус, медианный и другие.

Форма и структура аэрозольных частиц. Самыми простыми аэродисперсными системами являются туманы, частицы которых в большинстве случаев имеют шарообразную форму и при коагуляции сливаются в большую по размеру шарообразную частицу. В аэрозолях с твердыми частицами различают форму первичных частиц и форму возникающих агрегатов. В дымах обычно присутствуют первичные частицы, имеющие правильную форму микрокристаллов, так как она наиболее часто используется при кристаллизации охлаждаемого пара. Если же дым возникает в результате перехода паров сначала в капельки, которые в дальнейшем постепенно затвердевают, то твердые частицы могут иметь форму микрокристаллов, так и микроскопических шариков. Что касается

частиц дисперсионных аэрозолей, и прежде всего пыли, то они всегда имеют неправильную форму.

По форме частицы делятся на три группы:

1) Изометрические частицы, у которых все три размера имеют примерно одинаковую величину, причем по форме такие частицы близки к шару и правильным многогранникам. Поэтому аэрозоли с изометрическими частицами называются иногда изометрическими, в отличие от анизометрических, частицы которых имеют неправильную форму;

2) Ламинарные частицы, у которых два размера преобладают над третьим;

3) Фибропластинчатые частицы, которые имеют форму волокон, то есть те, у которых преобладает один из трех размеров.

Частицы-агрегаты возникают в результате коагуляции первичных частиц, причем такой агрегат может быть образован в некоторых случаях всего двумя первичными частицами, в других – несколькими миллионами частиц.

По форме различают два типа агрегатов: *изометрические* и *линейные* (или *цепные*). Линейные агрегаты представляют собой цепочки, образованные первичными частицами и имеющими иногда многочисленные разветвления. Возникновение агрегата определенного типа зависит от природы и состава аэрозольных частиц, от состава газовой среды, в значительной степени от наличия электрического поля и т.д.

Для характеристики аэрозольных частиц совершенно неправильной формы вводят специальное понятие – «степень неправильности», или так называемый *формфактор*. За степень неправильности обычно понимают отклонение формы частицы от шарообразной. В настоящее время наиболее часто используется понятие эквивалентной частицы, которая по каким-либо параметрам подобна действительной частице.

4 Элементы механики аэрозолей

Изучение движения частиц аэрозоля, их осаждения и коагуляции составляют предмет весьма важного раздела учения об аэродисперсных системах, который можно назвать *механикой аэрозолей*. Сюда же целесообразно отнести тесно примыкающий к проблемам осаждения и коагуляции вопрос о явлениях, происходящих при соприкосновении частиц друг с другом и с макроскопическими телами, а также мало изученный вопрос об обратных процессах – отрыве частиц от стенок и переходе порошкообразных тел в аэрозольное состояние.

Таким образом, предметом механики аэрозолей является изучение явлений и процессов с аэрозолями после стадии их образования. Здесь наблюдается полная аналогия с пониманием механики как одного из разделов физики. *Задачи механики аэрозолей* – разработка адекватных физико-математических моделей процессов и явлений эволюции аэрозолей и создание эффективных экспериментальных методик их исследования,

которые не только верифицируют теоретические предсказания, но и открывают новые стороны явлений и процессов. Основные направления, где необходимы результаты решения данных задач – процессы в аэрозольных технологиях, газоочистка, механика атмосферного аэрозоля.

4.1 Скорость падения частиц

Частицы пыли, дыма или тумана при свободном падении быстро достигают такой постоянной скорости, при которой аэродинамическое сопротивление, действующее на частицу, становится равным ее весу. Если размер частицы сравним с средней длиной свободного пробега молекул газа, то удары этих молекул приводят к случайному (броуновскому) движению, которое накладывается на ее гравитационное оседание. При очень малых размерах частицы и коротком времени наблюдения падение ее полностью маскируется броуновским движением. При рассмотрении скорости падения целесообразно взять простейший случай оседания жесткой сферической частицы в газе в отсутствие влияния других частиц и стенок сосуда. Если частица велика по сравнению с длиной свободного пробега газовых молекул, но не настолько велика, чтобы могли проявиться эффекты, связанные с инерцией газообразной среды, то применим закон Стокса. Приравнявая сопротивление Стокса эффективному весу шара, имеем:

$$3\pi\eta vd = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho - \rho') g \quad (4.1)$$

где d — диаметр шара; v — его конечная скорость падения; ρ — его плотность; η — вязкость воздуха, ρ' — его плотность; g — ускорение силы тяжести. Таким образом, если пренебречь ρ' по сравнению с ρ :

$$v = \frac{\rho g d^2}{18\eta} \quad (4.2)$$

Закон Стокса справедлив, если можно пренебречь влиянием инерции воздуха, вытесненного шаром, или другими словами, если отношение сил инерции к силам вязкости, т. е. число Рейнольдса $Re = d v \rho' / \eta$ очень мало. В результате многочисленных экспериментов с шарами в различных средах было найдено, что при $Re < 0,05$ отклонение от закона Стокса не превышает 1%; $Re = 0,05$ соответствует падению шара с плотностью 1 и диаметром 29 мк в воздухе. При более высоких Re отклонения возрастают и закон Стокса начинает давать завышенную скорость оседания.

Таблица 2 - Поправочные коэффициенты для расширения применимости закона Стокса

	формула	примечания
Закон Стокса в общем виде	$F = 3\pi\eta vd$	F – сила (дин), μ – вязкость среды (П), v – относительная скорость воздуха и частицы (см/с), и d – диаметр сферы

		(см).
При малом размере частиц (приближенном к молекулярным)	$F = 3\pi\mu v d / C_c$	Коэффициент сопротивления Милликена $C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} \left[A + Q \exp\left(-\frac{bd}{2\gamma}\right) \right]$
При низкой вязкости среды	$F = 3\pi\mu v d (1 + [3/16] \text{Re})$	Применяется при значениях числа Рейнольдса до 5
Для капель жидкости	$F_c = 3\pi\mu_m v d \left[\frac{1 + \frac{2\mu_m}{3\mu_p}}{1 + \frac{\mu_m}{\mu_p}} \right]$	μ_m - вязкость среды, μ_p - вязкость капли
Для частиц несферической формы (цепочки, хлопья)	$F = 3\pi\mu v d_c k$	k – поправочный динамический коэффициент формы, d_c - диаметр сферы, имеющей такой же объем как цепочка или волокно

4.2 Броуновское движение и диффузия

Частицы могут выводиться из аэрозольной системы двумя путями: 1) они способны коагулировать (агрегировать) с другими частицами и укрупняться до таких размеров, что будут интенсивно оседать на поверхности под действием силы тяжести; 2) могут мигрировать к поверхностям осаждения, ударяться о них и оставаться связанными с ними. *Процессы, вследствие которых аэрозольные частицы перемещаются к поверхности либо друг к другу без действия на них внешних сил, называются диффузионными, а движение частиц в таких процессах – броуновским движением.*

Также часто употребляется термин *броуновская диффузия аэрозолей*, он подразумевает перенос частиц из областей с большей их концентрацией в области с меньшей концентрацией.

Аэрозольные частицы, взвешенные в газе, беспорядочно перемещаются из-за соударений с молекулами газа. Можно сказать, что броуновское движение аэрозолей «проявляет» скрытое тепловое молекулярное движение. Это явление в 1828 году впервые наблюдал в жидкостях шотландский ботаник Броун, в честь которого оно и получило свое наименование. В 1881 году Бодашевский изучил броуновское движение аэрозолей и нашел, что оно подобно хаотическому движению молекул газа, постулируемому кинетической теорией.

Законы, описывающие броуновскую диффузию частиц

Аэрозольные частицы можно представить себе как один из компонентов многокомпонентной газовой смеси, тогда возможны и справедливы известные физические и математические аналогии с процессами диффузии в газах. Когда аэрозольные частицы однородно распределены в газе, броуновское движение будет изменять расположение отдельных частиц, но не ансамбля частиц как целого. Если же наблюдаются какие-либо неоднородности распределения частиц в пространстве, то броуновское движение будет способствовать выравниванию концентраций частиц в газе: из областей с высокими концентрациями они будут перемещаться в области с низкими концентрациями. Этот процесс диффузии частиц описывается теми же феноменологическими законами, что и процессы молекулярной диффузии – законами Фика.

Согласно первому закону Фика:

$$J = - D_B \nabla n \quad (4.3)$$

где J – плотность потока частиц ($1/(m^2 \cdot c)$), n – числовая концентрация ($1/m^3$), D_B (m^2/c) – коэффициент броуновской диффузии частиц. Этот закон описывает процесс стационарной диффузии и формулируется следующим образом: *плотность потока аэрозольных частиц через поверхность, нормальную к направлению переноса, пропорциональна градиенту концентрации частиц, взятому с обратным знаком.*

Согласно второму закону Фика:

$$\partial n / \partial t = D_B \nabla^2 n \quad (4.4)$$

Он описывает процесс нестационарной диффузии частиц в пространстве и формулируется так: *производная концентрации аэрозольных частиц по времени в данной точке пространства пропорциональна лапласиану концентрации в этой точке.*

Законы Фика являются феноменологическими и не могут расшифровать структуру коэффициента броуновской диффузии D_B , для этого требуется разработка микроскопической модели процесса броуновской диффузии. Если же эта задача будет решена, то уравнения (4.3) и (4.4) с соответствующими начальными и граничными условиями в принципе позволяют решать любые задачи диффузии аэрозолей в пространстве.

Теория броуновского движения Эйнштейна

В 1905-1906 гг. А. Эйнштейн опубликовал результаты, которые сегодня считаются основополагающими и классическими в теории броуновского движения аэрозольных частиц. В частности, им были получены выражения для среднего квадрата смещения частицы при ее броуновском движении и коэффициента броуновской диффузии частиц D_B .

Таблица 3 - Окончательные результаты теории Эйнштейна

Средний квадрат смещения частиц при поступательном движении	$\langle x^2 \rangle = 2D_B t$ $\langle s^2 \rangle = (4/\pi)D_B t$	Среднее значение квадрата смещения частицы Смещение частицы при трехмерном движении
Коэффициент поступательной броуновской диффузии частиц	$D_B = kTB$ $B = \frac{C_c}{6\pi\eta R_p}$	B – подвижность частицы (скорость, приобретаемая частицей под действием единичной силы), T – температура газа, k – постоянная Больцмана
Броуновское вращение частиц	$D_\theta = kT / (8\pi\eta R_p^3)$ $\langle \theta^2 \rangle = 2D_\theta t$	$\langle \theta^2 \rangle$ - среднее значение квадрата угла поворота частицы относительно выбранной оси вращения за время t

Диффузия частиц

При изучении диффузии рассматривают миграцию частиц аэрозоля в направлении градиента концентрации. Поскольку всегда частицы преимущественно перемещаются из зон с высокими концентрациями в зоны с низкими значениями, происходит миграция аэрозоля к стенкам или другим поверхностям, где концентрация, вследствие осаждения равна нулю. Однако есть случаи, когда аэрозоли находятся в весьма ограниченном пространстве, например, в органах дыхания или в тонких пробоотборных трубках, и тогда убыль частиц вследствие диффузии может быть ощутимой.

Таблица 4 - Осаждение аэрозолей в результате диффузии для разных случаев

Стационарная диффузия	Концентрация частиц неодинакова в различных точках, но со временем не изменяется. Например, диффузия частиц из зоны с постоянной концентрацией $c = c_0$ к стенкам, на поверхности которых концентрация равна нулю	Число частиц, оседающих на единицу поверхности за единицу времени, на основе первого закона Фика $J = Dc_0 / \delta,$ где δ – расстояние от зоны с постоянной концентрацией до стенки
Нестационарная диффузия	Концентрация аэрозолей меняется во времени. Причиной является	<i>Бесконечный объем, плоская вертикальная стенка</i> $Jdt = dN = c_0 \sqrt{D/(\pi t)} dt,$ проинтегрировав от $t=0$ до $t=t$,

	<p>диффузия и последующее оседание аэрозолей на стенках или иных поверхностях.</p>	<p>находим число частиц N, осевших на единице поверхности за время t:</p> $N = c_0 \sqrt{4Dt/\pi}$ <p><i>Осаждение в канале</i></p> $\frac{c_{\text{вых}}}{c_{\text{вх}}} = 1 - \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{DL}{uR^2}}$
<p>Конвективная диффузия</p>	<p>Перемещение частиц в движущейся среде. Частицы могут перемещаться как посредством диффузии, так и вместе с потоком. Полный поток равен сумме двух потоков.</p>	<p><i>Общее уравнение в векторной форме</i> (сумма конвекционной и молекулярной диффузии соответственно)</p> $J = cu - D \text{grad} c$ <p><i>Общее уравнение для системы декартовых координат</i></p> $u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение образования и физики аэрозолей открывает широкие возможности для решения целого ряда прикладных задач, имеющих важное народнохозяйственное значение. Чрезвычайное многообразие процессов, регулирующих содержание и структуру аэрозольных частиц в атмосфере, и весьма изменчивая их природа приводит к значительным вариациям аэрозольного компонента атмосферы. Для решения многих теоретических и прикладных задач требуются описание структуры атмосферных аэрозолей, которую проще строить, используя набор моделей для характерных условий.

В представленной работе были рассмотрены некоторые основные процессы, регулирующие структуру аэродисперсной системы: конденсация, диспергирование, оседание и диффузия. Роль этих процессов в различных условиях существенно меняется.

Наиболее важными характеристиками аэрозольных моделей являются: пространственная структура поля концентрации аэрозолей $N(r, x, y)$, распределение частиц по размерам $n(r)$, химический состав частиц, определяющий в значительной степени физико-химические свойства аэрозолей, в частности плотность вещества частиц ρ , форма частиц, изменение указанных характеристик во времени и в зависимости от метеорологических факторов. Основные допущения, используемые при создании аэрозольных моделей - это предположение, что все аэрозольные частицы имеют сферическую форму, предположения о равномерном распределении химических соединений в аэрозолях определенного типа и в веществе аэрозольных частиц разных размеров, о горизонтальной однородности структуры атмосферных аэрозолей на достаточно больших расстояниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грин Х., Лейн В.* «Аэрозоли – пыли, дымы и туманы» Пер. с англ. ред. д-ра хим. Наук Фукс Н.А.– Л.:Изд-во «Химия», 1972, стр. 428
2. *Ивлев Л.С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд. ЛГУ, 1982.
3. *Ивлев Л.С., Довгальок Ю.А.* Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999.
4. *Райст П.* «Аэрозоли. Введение в теорию»: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – стр. 278
5. *Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б., Шторх О.* «Аэрозоли» Пер. с чешского Рябова Н.В., Стася К.Н., под ред. К.П. Маркова и М.П. Пчельникова – М.: Атомиздат, 1964, стр. 360
6. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М.: Изд. АН СССР, 1955.