

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ АЭРОЗОЛЕЙ

И. Е. Ковбасюк
ООО НПЦ «Клинтрум Инструментс»

Нет такой стороны жизнедеятельности человека, которая не зависела бы от аэродисперсных систем. Человеку, равно как и любому живому существу, чтобы жить, необходимо дышать. А дышим мы сложнейшей дисперсной системой – всем хорошо известной смесью газов, содержащей вдобавок миллионы и миллионы мельчайших взвешенных частиц, самых разнообразных по составу и строению, зачастую вредных и даже ядовитых. Тем не менее, эту дисперсную систему мы по привычке считаем и зовем просто чистым воздухом. Чистого же воздуха на нашей планете, на самом деле, нет вообще.

Вероятно, каждый из нас, кто слышал слово «аэрозоль», подсудно представляет его значение и способен назвать несколько примеров аэрозольных систем. Однако далеко не каждый сможет четко сформулировать, что же такое аэрозоль, и многие не подозревают, что сталкиваются с различными аэрозольными системами на каждом шагу.

Так что же такое аэрозоль? В настоящее время под аэрозодем принято понимать дисперсную систему с газообразной средой и с твердой или жидкой дисперсной фазой. Иными словами, это взвесь твердых или жидких частиц в воздухе или каком-либо другом газе или смеси газов. Даже самый чистый атмосферный воздух всегда содержит не менее 100 взвешенных частиц в 1 см³, т.е. представляет собой аэрозоль. Человек погружен в аэрозоль, дышит им и своей деятельностью непрерывно создает аэрозольные частицы. Таким образом, аэрозоль – это привычная среда обитания человека. Можно привести множество примеров как естественных аэрозолей, так и антропогенных, т.е. возникающих вследствие деятельности человека. Это и облака в небе, туманы, пыль над дорогой, облака вулканических извержений, смог в городах, дым от пожаров и даже самый чистый горный воздух. [1].

Итак, сами аэрозоли – явление природы, и человечество было окружено аэрозолями с самого момента своего появления. Окружающий человека «океан» аэрозолей – естественная среда его обитания, поэтому он в достаточной мере к ней приспособился и до поры до времени не задумывался о роли микроскопических частиц в своей жизни. Однако с развитием цивилизации и индустриализации ситуация изменилась. Антропогенное воздействие человека привело к резко увеличившейся запыленности атмосферы городов. И аэрозоли стали представлять угрозу не только для здоровья человека, как в случае

со смогом, но и для как уже созданных, так и создаваемых человеком технологий.

Современный этап развития промышленности характеризуется операциями с микроколичествами вещества, а вновь разрабатываемые процессы уже описываются термином «нанотехнологии». При этом для таких технологических процессов характерны, во-первых, манипуляции с микро- или нанообъектами, и, во-вторых, защита самого процесса и его продукта от микрозагрязнений, которые могут вывести изготавливаемую продукцию из строя и даже стать источником опасности для людей, вплоть до возникновения аварийных ситуаций. Кроме того, аэрозольные частицы могут способствовать осложнениям после операций или распространению радиоактивных загрязнений и микроорганизмов. Это обстоятельство делает необходимым постоянный инструментальный контроль наличия в воздухе – как технологической среде – микрозагрязнений и динамики их изменений.

Аэрозоли: общие понятия

На первый взгляд может показаться, что, разделив аэрозоли на три больших класса – пыли, дымы и туманы, можно охватить все случаи, однако при более внимательном рассмотрении оказывается, что многие аэродисперсные системы можно с одинаковым правом отнести к двум классам, а некоторые системы не принадлежат ни к одному из этих классов. Несмотря на существование таких исключений, узаконную классификацию целесообразно сохранить.

Пыли (dusts) состоят из твердых частиц, диспергированных в газообразной среде в результате механического измельчения твердых тел или под действием аэродинамических сил на порошкообразные материалы. В обыденной жизни пылью нередко называют осадок пыли на различных поверхностях, легко переходящий обратно в взвешенное состояние. В большинстве случаев пыли содержат больше крупных частиц, а их счетная концентрация обычно мала по сравнению с дымами и туманами.

Раньше дымами (smokes) называли лишь аэрозоли, образующиеся при горении, однако в настоящее время термин «дым» включает в себя многие другие аэродисперсные системы, как, например, аэрозоли, образующиеся при возгонке и конденсации паров, а также в результате химических и фотохимических реакций.

Туманы (mists) состоят из капелек жидкости, образующихся при конденсации пара или распылении жидкости. При этом в капельках могут содержать-

ся растворенные вещества или суспендированные твердые частицы. Характерным признаком, отличающим туманы от дымов, служит больший размер частиц. Термином смог (smog = smoke + fog) называют систему, образующуюся в результате взаимодействия природного тумана с газовыми выбросами из заводских труб. Это обозначение стали применять также к любым раздражающим и вредным аэрозолям в атмосфере [2].

Отдельно взятая аэрозольная частица определяется своими размером, формой, структурой, химическим составом и агрегатным состоянием вещества, из которого она состоит. Аэрозоли состоят из большого числа частиц, следовательно, для их описания необходимо знать концентрацию частиц в единице объема воздуха или газа. Но этим свойства аэрозолей не исчерпываются, поскольку они определяются не только самими частицами, но и давлением и температурой воздуха или другого газа, скоростью течения, наличием турбулентностей и т.д. Поэтому основными характеристиками аэрозолей, достаточно определяющими их свойства, принято считать именно размер частиц и их концентрацию.

Размеры частиц, изучаемых в физике аэрозолей, лежат в интервале, охватывающем четыре порядка величины: 10^{-2} – 10^2 мкм. Это связано с тем, что нижняя граница этого интервала лежит в области перехода от молекулы к частице, а частицы крупнее 100 мкм не способны длительное время оставаться во взвешенном состоянии [3]. Для наглядности стоит привести несколько примеров. Например, диаметр частиц табачного дыма составляет 0,25 мкм, а цветочная пыльца на два порядка крупнее – 15–20 мкм. Часто наблюдаемый нами атмосферный туман содержит частицы размером 2–50 мкм, а размер частиц, распыляемых из аэрозольного баллончика, – лежит в интервале от 1 до 100 мкм.

В зависимости от соотношения размеров частиц аэрозоли делятся на монодисперсные и полидисперсные. Под монодисперсным аэрозолем понимают аэродисперсную систему, содержащую частицы одного размера, а под полидисперсным аэрозолем – систему, содержащую частицы различных размеров. Если монодисперсные аэрозоли можно описать двумя параметрами – счётной концентрацией и размером частиц, то для описания полидисперсного аэрозоля необходимо не только подсчитать количество частиц в объёме воздуха, но и определить размер каждой частицы. На практике, естественно, измеряются не все частицы, а лишь такое их количество, чтобы обеспечить статистическую достоверность измерений. Поэтому основной характеристикой, описывающей количество частиц, является именно счётная концентрация частиц – среднестатистическое количество отдельных аэрозольных частиц определенного размера, содержащихся в единице объема воздуха [3].

Изучение аэрозолей

Принимая во внимание столь существенное 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 – нелюбимая падчерица физики или, может быть, физической химии и только с недавнего времени стала «расцветать» и возбуждать к себе заслуженный интерес.

Изучение основных свойств аэрозолей в прошлом проводилось нерегулярно. По какой-то причине мы склонны, наблюдая непонятные, но обыденные явления, не отдавать себе отчета в том, почему это происходит. Почему облако остается в воздухе? Откуда оно появилось и куда движется? Что такое дым? Твердое это вещество или газ? Многие люди ошибочно полагают, что дым – это газ. Почему одна пыль вредна, а другая – нет? И почему одна и та же пыль в одном случае вредна, а в другом – нет?

То, что пыль вредна, известно давно. Уже издавна ученые отмечали обычную связь легочных расстройств с вдыханием пыли, хотя часто не делали различия между типами респираторных заболеваний. Например, в первом веке до нашей эры римский ученый Плиний упоминал о «фатальной пыли». В XIV веке Агрикола при описании рудников говорил о «ядовитом воздухе» и «едкой пыли». Итальянский физик Рамазини в 1700 г. опубликовал книгу, в которой описал влияние пыли на органы дыхания, приведя при этом многочисленные примеры происходящих от пыли болезней со смертельным исходом.

С промышленной революцией XIX века и с появлением высокоскоростных механизмов чрезвычайно возросла запыленность. Одновременно возросло и число ученых, занимающихся изучением пыли. В конце 19-го столетия внимание исследователей привлекло воздействие пыли на горнорабочих, особенно на шахтах по добыче золота в Южной Африке и на оловянных рудниках Корнуолла. В результате этих и других работ было найдено, что высокая запыленность приводит к большому числу легочных заболеваний. Несмотря на то, что связь уровня запыленности с болезнями была доказана, было предпринято мало усилий для изучения пыли в воздухе. Оставалось невыясненным как её улавливать, как контролировать, каковы ее основные физические свойства, как она образуется и куда, в конечном счете, девается. Не перестает изумлять тот факт, что ученые, изучавшие аэрозоли в начале XIX века, были способны решать сложные задачи, несмотря на то, что обладали крайне ограниченными аппаратом знаний.

В XIX веке аэрозоли (хотя самого термина «аэрозоль» еще не существовало) занимали важнейшее место в науке, поскольку тогда они предполагались мельчайшими частицами вещества. Нашему пониманию свойств аэрозолей способствовали работы многих замечательных ученых, интеллектуальных гигантов своего времени. Среди них – Тиндаль, Листер, Кельвин, Максвелл, Айткен, Эйнштейн, прославившиеся в других областях науки, но также широко известные в литературе по аэрозолям. Однако с открытием радиоактивности и развитием квантовой

механики ученые в поисках мельчайших частиц Вселенной отошли от изучения аэрозолей, и наука об аэрозолях пришла в упадок, несмотря на то, что открытия в медицине, касающиеся связи пыли с заболеваниями, продолжали появляться. Аэрозоли изучали применительно только к профессиональным заболеваниям, и эти работы носили прикладной характер.

Использование аэрозолей в военных целях и в качестве дымовых завес привело к тому, что в период между первой и второй мировыми войнами стали изучать их свойства. Однако 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 «горячих частиц» – 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. В-третьих, с развитием микроэлектроники возникла насущная проблема контроля запыленности воздуха и снижения количества брака. 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. За последние 50 лет число исследований аэрозолей значительно возросло. По крайней мере два научных журнала целиком посвящены этим проблемам, а множество других регулярно публикуют статьи по различным аэрозольным аспектам [3].

Важнейшие вехи в развитии теории аэрозолей

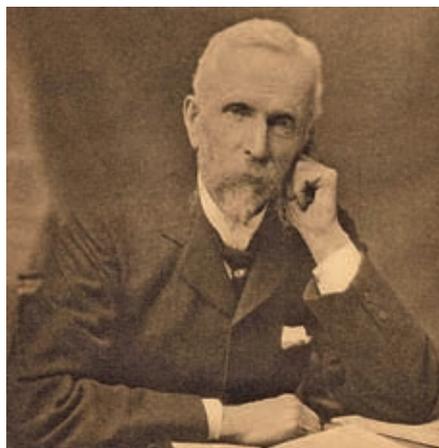
Маленькие частички, суспендированные в газе, беспорядочно перемещаются из-за соударений с быстро движущимися молекулами газа. Их движение отчасти можно представить как вибрацию всего ансамбля частиц, хотя имеются и перемещения любой частицы относительно других. Это явление в 1828 г. впервые наблюдал в жидкости шотландский натуралист Роберт Броун, в честь которого оно получило свое название. В 1881 г. польский физик Бодашевский изучил броуновское движение частиц дыма и других воздушных суспензий и нашел, что оно подобно движению газовых молекул, постулированному кинетической теорией. Независимо от того, находятся ли частицы в газе или в жидкости, принципы броуновского движения остаются неизменными.

Кульер в 1875 г. и Айткен в 1880 г. обнаружили интересное явление: для образования облака

путем адиабатического расширения сжатого воздуха (т.е. когда между влажным воздухом и камерой, где он находится, отсутствует теплопередача) необходимо наличие маленьких частиц пыли. Если же воздух пыли не содержит, то облако не образуется. В этом случае образование облака начинается только при очень сильном расширении. Чарльз Вильсон продолжил исследования, определив условия образования облака в отсутствие частиц пыли: образование капель при пересыщении в присутствии ионов либо спонтанное образование капель, но при более высоком пересыщении. Эти исследования впоследствии привели к созданию камеры Вильсона, которая используется для непосредственного наблюдения ионных треков.

В 1877 г. Джеймс Максвелл сформулировал уравнение, описывающее испарение капли в зависимости от времени. Хотя его формулировка содержит ряд упрощающих предположений, уравнение Максвелла дает приемлемые результаты для достаточно крупных капель чистого вещества [3].

В 1871 г. Джон Уильям Рэлей (John Rayleigh) описал когерентное рассеяние без изменения длины волны на частицах, размер которых много меньше длины волны падающего излучения. Для аэрозольных систем закон Рэрея имеет ограниченное значение, но он послужил основой для общей теории. Полное аналитическое решение для рассеяния излучения сферическими частицами, сравнимыми по размерам с длиной волны падающего излучения, было получено Густавом Ми (Gustav Mie) в 1908 г. Однако основы теории были изложены датским физиком Людвигом Лоренцем (Ludvig Lorenz) еще в 1890 г. Используя решение векторного волнового уравнения, полученного в 1881 г. Лембом, Дж. Томсон опубликовал в 1893 г. формулы, выведенные позже Ми, для идеально проводящей сферы. В 1899 г. Лав и Уокер показали, что решение Лемба-Томсона может быть использовано и для сферических частиц из диэлектриков. Теория Ми имеет весьма общее значение: она применима как к мелким частицам, лежащим в рэлеевской области, так и к крупным, к которым применима классическая геометрическая оптика, причем не только к диэлектрическим, но и к поглощающим частицам [2].



Джон Айткен (1839–1919)



Сэр Джон Рэлей (1842–1919)

Хотя теория Ми была опубликована в 1908 г., до 1941 г. расчеты проводились редко и только приближенно, так как отсутствовали обширные таблицы амплитудных функций Ми, необходимые для точных вычислений. В 1943 г. Ла Мер и Синклер (David Sinclair) приступили к систематическому изучению явлений рассеяния света в дисперсных системах, а несколько лет спустя появился их обзор по этому вопросу [2, 3].

Изучение аэрозолей в России.

Работы Н.А. Фукса

Изучение аэрозолей в России началось в 1930-е гг., когда профессор Николай Альбертович Фукс (1895–1982) разработал первые подходы к физике взвешенных в воздухе частиц. Профессор Фукс является общепризнанным основоположником науки об аэрозолях. Он начал свои первые исследования во многих ключевых областях аэрозольной науки задолго до появления вместе с развитием атомной и электронной промышленности сильной практической потребности в этих исследованиях. Эти исследования заложили научную основу для создания НЕРА-фильтров, измерения концентрации частиц, изучения движения потоков воздуха и т.д.

Фукс обладал редким даром сочетать теоретическую и экспериментальную работу одновременно, что стало ключом к его успеху. Его первые фундаментальные исследования были посвящены таким важным областям как методы измерения размера и заряда частиц аэрозолей, изучения испарения и конденсационного укрупнения, развитие новых фильтрующих материалов. К сожалению, его выдающиеся исследования были прерваны на время с 1937 по 1947 гг., когда Фукс, как и многие невинные люди в то время, был репрессирован.

В 1945 году Н. А. Фукс был освобожден из заключения и направлен главой физической лаборатории предприятия в городе Загорске Московской области. Сюда ему переслали его старые научные труды и дали возможность читать современную научную литературу. Здесь он написал монографию «Механика аэрозолей» – основополагающий и наиболее цитируемый на сегодняшний день труд по аэрозольной науке в мире. В ноябре 1946 г. Фукс вернулся



Н.А. Фукс (1980, худ. Китаев, холст, масло) [4]

в Москву, в 1947 году защитил докторскую диссертацию. Лишь в 1958 году он был официально реабилитирован и принят на старое место работы в Научно-исследовательском физико-химическом институте (НИФХИ) имени Л.Я. Карпова, где и проработал до конца своей жизни. Многие из его исследований настолько опережали время, что только сейчас мы начинаем понимать их практическую ценность. К их числу относятся классификация частиц по подвижности, коагуляция и другие явления высокодисперсных аэрозолей. Фукс не только внес неоценимый персональный вклад в развитие теории заряженности аэрозолей, исследования коагуляционной эффективности частиц в свободном молекулярном состоянии, конденсационного укрупнения аэрозолей и других областей науки об аэрозолях, но также вместе со своими учениками разработал теорию фильтрации аэрозолей, свойства высокодиспергированных частиц, процессы в многоканальных диффузионных батареях.

Он был постоянным членом редколлегии первого международного журнала «Journal of Aerosol Science». Немало специалистов в разное время проходило стажировку в его лаборатории.

В 1995 г. широко отмечалось 100-летие со дня рождения профессора Фукса и, по этому случаю, была основана международная премия имени Николая Фукса, присуждаемая за достижения в области физики аэрозолей и дисперсных сред [5, 6].

Однако изучение аэрозолей в России не ограничивалось работами Фукса. На основании обширных данных, собранных на Эльбрусе, Л. Левин установил, что распределение размеров капелек в природных облаках имеет логарифмически-нормальный вид. В подавляющем большинстве конденсационных и дисперсионных аэрозолей кривые распределения имеют несимметричную форму с более крутым наклоном в сторону малых размеров. Если взять за абсциссу логарифм радиуса, то кривые распределения принимают более симметричную форму и приближаются к кривой распределения Гаусса. После открытия Левина логарифмически-нормальное распределение было найдено и в других аэрозолях конденсационного и дисперсионного происхождения:



Н.А. Фукс и В. Ла Мер, 1964, НИФХИ, Москва [5]

в каменной и урановой пыли, образующейся при механическом дроблении, в туманах, полученных дисковым распылителем, в аэрозолях NH_4Cl и H_2SO_4 , образовавшихся путем смешения газообразных компонентов, и т.д. Логарифмически-нормальное распределение размеров аэрозолей имеет и теоретическое значение. В частности, как показал А. Колмогоров, исходя из простых гипотез о характере процесса дробления твердых частиц, можно доказать, что распределение размеров частиц асимптотически стремится по мере хода измельчения к логарифмически-нормальному [7].

Происхождение термина

Парадоксально, но сам термин «аэрозоль» обязан своему происхождению войне. Первая мировая война ознаменовалась появлением и широким применением первого вида оружия массового поражения – химического. Вначале новый тип оружия называли просто «газы», что вполне соответствовало действительности. 15 июня 1915 г. на франко-германском фронте состоялось первое в истории применение химического оружия, которое заключалось в выпуске газообразного хлора из баллонов. Десятки тысяч солдат были отравлены прежде, чем было найдено средство защиты от газов – противогаз – и освоено его промышленное производство. Газы имеют свойство легко адсорбироваться твердыми поверхностями. Большой скорости адсорбции способствует большая величина коэффициента молекулярной диффузии. Поэтому достаточно пропустить вдыхаемый человеком отравленный воздух через слой активированного угля – адсорбента, обладающего большим количеством пор, т.е. очень большой удельной поверхностью.

Но вскоре немецкие военные химики нашли способы создания ядовитых облаков, частицы которых могли проходить через противогазы. Они разработали боеприпасы – снаряды и дымовые шашки («синий крест»), в которых возгонялись соединения мышьяка, в первую очередь дифенилхлорарсин, известный как «чихательный газ». Испарившиеся при горении шашки пары этого вещества конденсировались в воздухе с образованием аэрозольных частиц. А коэффициент броуновской диффузии частиц аэрозолей на четыре-пять порядков меньше коэффициента диффузии газовых молекул, т.к. он обратно пропорционален корню из массы частицы. Поэтому при просасывании ядовитого аэрозоля через противогазную коробку частицы попросту не успевают продиффундировать к поверхности зерен активированного угля. А те, которые все же коснулись зерен, не могут протиснуться вглубь узких пор, осаждаются на внешней поверхности гранул угля, составляющей лишь ничтожную часть всей поверхности.

Затем отравляющее вещество (люизит, или бета-хлоровинилдихлорарсин), пары которого образуют в атмосфере конденсационный аэрозоль, создали американцы. Способны конденсироваться в аэрозоль и пары иприта (дихлордиэтилсульфид).

Применение отравляющих веществ в форме аэрозолей оказалось более эффективным. Аэрозольные облака медленнее рассеиваются в атмосфере, в меньшей мере захватываются почвой и растительностью. Аэрозольное облако может иметь достаточно сильный запах. Поэтому в годы первой мировой войны, когда не было приборных средств обнаружения химического нападения, именно запах часто служил сигналом для одевания противогазов. Запах цветущих яблонь, присущий метилцианкарбонату, или горчичный запах иприта вселял ужас в солдат воюющих сторон [1].

Впервые понятие аэрозоля для описания взвеси микроскопических частиц в воздухе использовал ирландский химик Фредерик Джордж Доннэн (Frederick G. Donnan) во время Первой мировой войны. Термин аэрозоль был использован им для обозначения тонких аэродисперсных систем, таких как ядовитые дымы фенилхлорарсина. Независимо от Доннэна этим термином начал пользоваться Август Шмаусс (August Schmauss), которому принадлежит первая статья, где было упомянуто слово «аэрозоль». Термин аэрозоль был получен по аналогии с термином гидрозоль, использовавшегося для описания жидких коллоидных суспензий. Указанные авторы считали аэрозоли аналогами систем с жидкой средой, однако вскоре стало ясно, что эти два класса дисперсных систем существенно различны вследствие присущей аэрозолям неустойчивости.

К сожалению, в наше время термин аэрозоль начали применять к системам, для которых он никогда не предназначался, и стали называть аэрозолями любые аэросуспензии [1, 2, 8].

Чистые помещения

Интерес к изучению аэрозольных микроскопических частиц неразрывно связан с осознанием потенциальной угрозы, которые они могут нести, и изучением возможности исключения их влияния, равно как и самих частиц. Иными словами, изучение появления, поведения и устранения микрочастиц аэрозолей тесно связано с появлением и развитием чистых производственных помещений (ЧПП).

Чистое помещение – это современный феномен, хотя основы проектирования и эксплуатации ЧП имеют уже более чем вековую историю. Любому человеку интуитивно понятно, что чистое помещение – это помещение, в котором чисто. Тем не менее, в настоящее время под чистым понимается то помещение, в котором контролируется счетная концентрация аэрозольных частиц и которое построено и используется так, чтобы свести к минимуму поступление, генерацию и накопление частиц внутри помещения, и в котором, при необходимости, контролируются другие параметры, например, температура, влажность и давление [9, 10].

Первые шаги по созданию ЧПП

Впервые с проблемой чистоты столкнулась медицина. В работах Пастера, Коха, Листера (Lister)

cool technologies, hot opportunities

CHILLVENTA ROSSIJA 2014

chillventa-rossija.ru

МОСКВА,
КРОКУС ЭКСПО
4-6 ФЕВРАЛЯ 2014

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ,
КЛИМАТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И ТЕПЛОВЫХ
НАСОСОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
ТОРГОВЛИ И СТРОИТЕЛЬСТВА

new

Павильон
«Чистые
помещения и
климатические
камеры»

Chillventa Россия –

ведущая специализированная выставка в России, ориентированная на освещение отечественных и зарубежных инноваций в области промышленного холода, кондиционирования и тепловых насосов.

Выставка Chillventa Россия – это информационная и деловая площадка для обмена актуальными научными решениями и продвижения Вашего бизнеса.

Не упустите возможность представить бренд, продукцию и технологические разработки Вашей компании вниманию специалистов отрасли и потенциальных деловых партнеров.

Информацию по выставке и участию Вы найдете на сайте chillventa-rossija.ru

Контакт для
российских экспонентов:
Мария Беляева
ООО «ОВП-РУС»
Международная – 2, офис 533
Краснопресненская наб., 12
123610 Москва, Россия
Тел. +7 495 967-04-64
Факс +7 495 967-04-62
Email: m.belyaeva@owp-russia.ru

NÜRNBERG MESSE



Джозеф Листер (1827–1912)

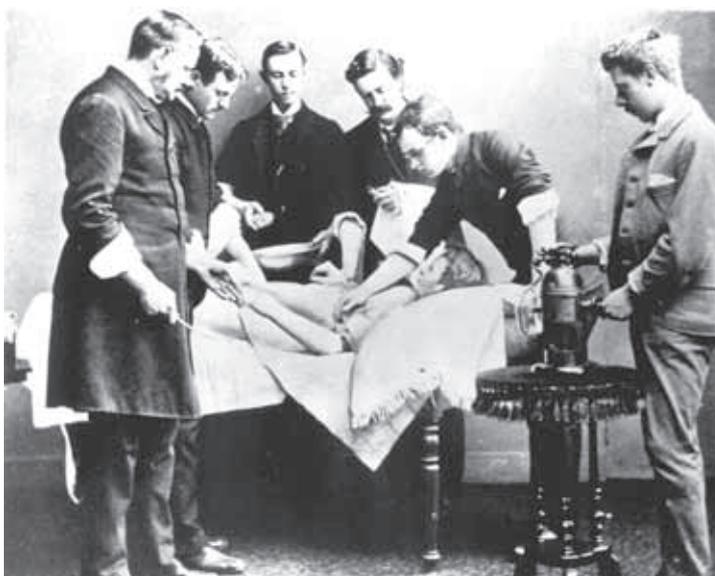


Рис. 1. Группа хирургов с распылителем Листера [9]

и других пионеров микробиологии и хирургии свыше ста лет назад было установлено, что источником инфекции являются бактерии. Из этого следовало, что удаление бактерий из больниц, а особенно из операционных, должно предотвратить возникновение инфекций. Этот постулат явился научным обоснованием для разработки первых чистых помещений. В 1860-е годы Джозеф Листер добился значительного снижения инфекционных осложнений в своей операционной в Королевской больнице в г. Глазго благодаря обработке антисептическим раствором (карболовой кислотой) инструментов, рук хирурга и хирургических разрезов и пытался предотвратить аэрозольное распространение инфекции путем распыления этого раствора в воздухе (рис.1). Один из бывших ассистентов Листера – сэр Уильям МакЭван (William MacEwan) вместе с хирургами Германии и США развил идеи Листера и перешел от антисептического метода к асептическим методам. Их асептический подход предусматривал не уничтожение проникших в хирургический разрез бактерий, а предупреждение возможности их проникновения туда. В практику вошла стерилизация (кипячение) инструментов и перевязочных материалов, хирурги и медицинские сестры стали следить за тщательной обработкой рук для удаления с них бактерий. С 1900 г. стали использоваться хирургические перчатки, маски и халаты, которые перед началом операции обрабатывались паром. Эти методы явились базой для разработки чистых технологий, которые применяются и сегодня.

Хотя чистые помещения тех лет уже в чем-то подходили на современные, в них был упущен такой важный фактор, как приточная вентиляция с фильтрацией подаваемого воздуха. До 40-х гг. XX века принудительная вентиляция применялась редко и служила исключительно для создания комфорта, нежели для снижения загрязнений. Только по окончании Второй мировой войны (1945 г.) принудительная

вентиляция стала внедряться в больницах именно с целью защиты от загрязнений. В это время начались исследования проблем, связанных с инфицированием людей содержащимися в воздухе частицами в ситуациях вынужденного скопления людей, характерных для военного времени, таких как подводные лодки, бомбоубежища или казармы. Вероятность бактериологической войны потребовала исследования распространения взвешенных в воздухе микроорганизмов. Был изобретен пробоотборник находящихся в воздухе бактерий, а во время Второй мировой войны проводились исследования вентиляции помещений и аэродинамики частиц. Таким образом, к началу 60-х гг. XX века было известно большинство основополагающих принципов, определяющих характеристики турбулентно вентилируемых помещений. Было также установлено, что люди являются источником находящихся в воздухе бактерий, переносимых отшелушившимися частицами наружных кожных покровов. Кроме того, выяснилось, что одежда из рыхлой хлопчатобумажной ткани слабо препятствует их распространению, а значит, для спецодежды необходим более плотный материал.

Использование однонаправленного воздушного потока для эффективного удаления загрязнений из больничных палат было предложено еще в 1864 г. сэром Джоном Саймоном (Simon), однако уровень знаний по аэродинамике в то время не был еще достаточным для получения ожидаемых результатов.

В работе Бурдийона (Bourdillon) и Коулбрука (Colebrook), опубликованной в 1946 г., описан перевязочный пункт, в котором кратность воздухообмена в час достигала 20, что позволило получить в комнате избыточное давление по отношению к окружающим помещениям. Авторы рассмотрели эффект «воздушного поршня», заключающийся в том, что воздух формирует «слои, которые опускаются вниз слишком медленно, чтобы вызвать завихрения, и, по мере продвижения, толкающие грязный воздух перед



Рис. 2. Типичная операционная XIX в. с т.н. операционным театром

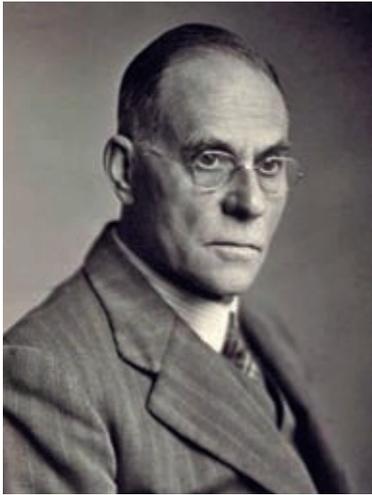
собой». Однако, они не стали развивать свои идеи дальше, так как применение таких больших объемов подаваемого воздуха для больниц было слишком дорого. Позднее, в 1960 г., идея медленного перемещения воздуха вниз с минимальной турбулентностью рассматривалась Блоуэрсом (Blowers) и Крю (Crew). По предложению О. Лидуэлла (Lidwell) авторы исследовали помещение, в которое воздух подавался через воздухораспределители, установленные по всему потолку, в режиме, близком к однонаправленному воздушному потоку. Однонаправленность воздушного потока в такой схеме нарушалась лампами,

освещавшими операционный стол, а также передвижениями находившихся в помещении людей. Тем не менее, такая система оказалась намного эффективнее всех исследованных ранее, но раскрыть все её возможности не удалось из-за слишком низкой величины потока подаваемого в помещение воздуха.

Решающий импульс в деле обеспечения чистоты воздуха в операционных придал работы профессора сэра Джона Чарнли (John Charnley). Чарнли был пионером в такой области хирургии как тазобедренная имплантация, разработав методику операции по замене больного сустава искусственным (пластмассовым или металлическим). Однако в 10% случаев возникали инфицированные осложнения. Это явилось серьезной проблемой, подтолкнувшей его на введение ряда профилактических мер. Учитывая накопленный опыт, Чарнли с помощью компании Howorth Air Conditioning решил модернизировать систему приточной вентиляции в своей операционной. Как и Блоуэрс и Крю он использовал эффект «воздушного поршня», но в отличие от них использовал для этого не весь потолок, а ограничился небольшой его частью над операционным столом. В результате внутри операционной он соорудил стерильную палатку площадью 2×2 м², получившую название «парник» («greenhouse»). Усовершенствовав конструкцию и увеличив количество подаваемого внутрь воздуха, Чарнли в результате уменьшил число осложнений с 10% в 1959 г. до 1% к 1970 г. В 1980-х гг. Медицинский исследовательский совет Великобритании подтвердил, что применение чистых зон с однонаправленным воздушным потоком, а также использование специальной изолирующей одежды для медицинского персонала на четверть снижает



Джон Саймон (1816–1904)



Леонард Коулбрук (1883–1967)



Джон Чарнли (1911–1982)

риск инфицирования по сравнению с турбулентно вентилируемыми операционными палатами [9,10].

Появление и развитие ЧПП в промышленности

Аналогичные успехи были достигнуты в технических отраслях промышленности. Разработка первых чистых помещений для промышленного производства началась во время Второй мировой войны. В основном это было обусловлено попытками повышения качества и надежности узлов и деталей различных видов вооружения, танков и самолетов. Появилось понимание того, что если не добиться чистоты в производственной зоне, то такие узлы, как, например, бомбардировочные прицелы или прецизионные подшипники, могут отказывать или работать неправильно. В это время были построены чистые помещения, в которых просто копировались конструкции операционных и опыт их эксплуатации. Но очень скоро пришло понимание того, что отсутствие микроорганизмов и отсутствие частиц – это далеко не одно и то же. Значительные усилия были направлены на внедрение материалов, поверхность которых не выделяет частиц, но осознание того, что распространение по воздуху множества частиц, выделяемых оборудованием и персоналом, можно уменьшить за счет подачи в помещение больших объемов чистого воздуха, еще не пришло.

Открытие процессов ядерного расщепления, а также исследования в области разработки биологического и химического оружия, проводимые в период Второй мировой войны, стимулировали производство высокоэффективных воздушных фильтров HEPA (High Efficiency Particulate Air), необходимых для очистки воздуха от опасных микробиологических или радиоактивных аэрозольных загрязнений. Появление таких фильтров позволило обеспечить чистые помещения очень чистым воздухом

и достичь низких уровней аэрозольного загрязнения.

Помещения с большими объемами хорошо очищенного воздуха, подаваемого через потолочные воздухораспределители, стали строиться в период с 1955 г. до начала 60-х гг., причем большинство из них предназначалось для производства гироскопов.

Переломным моментом в истории чистых помещений стала разработка в 1961 г. концепции вентиляции с «однонаправленным», или «ламинарным» потоком воздуха, осуществленная в лаборатории компании Sandia (г. Альбукерк, Нью-Мехико, США). Разработка велась группой специалистов, но наибольший вклад принадлежал Уиллису Уитфилду (Willis Whitfield).

На рис. 3 представлена схема первой чистой комнаты с ламинарным воздушным потоком. Помещение было небольшим, порядка 2×3×2 метра. Воздух подавался через ряд HEPA-фильтров, а не через потолочные воздухораспределители. Это обеспечило однонаправленное движение воздуха от фильтров через все помещение и далее наружу через перфорированный пол. В таком помещении человек, работающий за столом, не будет загрязнять объекты перед собой, поскольку генерируемые им загрязнения будут удаляться потоком воздуха. Концепция вентиляции чистой комнаты с помощью однонаправленного потока воздуха была быстро реализована, поскольку ощущалась острая необходимость в чистых помещениях высокой степени чистоты. В 1957 году Советский Союз вывел на орбиту первый искусственный спутник Земли, и началась гонка в космосе. Стремление увеличить полезную нагрузку космических аппаратов вызвало потребность в легких

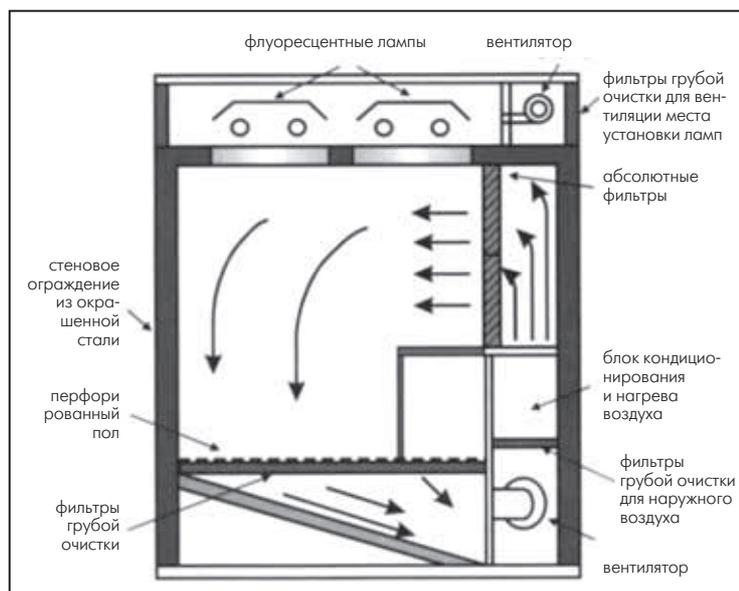


Рис. 3. Схема первой чистой комнаты с ламинарным потоком



Рис. 4. Уиллис Уитфилд в разработанном им чистом помещении компании Sandia [11]

миниатюрных микроэлектронных компонентах. Однако миниатюризация повысила их уязвимость по отношению к загрязнениям. Стало очевидно, что для производства полупроводниковых элементов необходима очень чистая производственная среда и что помещения с ламинарным воздушным потоком позволяют добиться уровня чистоты на несколько порядков выше, чем это удавалось ранее. Метод вентиляции с использованием ламинарного воздушного потока был сразу же внедрен в фармацевтическую промышленность и в больницы [9, 10].

Создание приборов для подсчета количества аэрозольных частиц

Долгое время в аэрозольном приборостроении были реализованы лишь интегральные фотометрические методы – нефелометрия и турбидиметрия, позволявшие с удовлетворявшей исследователей точностью измерять массовую концентрацию частиц в дисперсных системах с большой концентрацией частиц аэрозоля. Лишь возникший в середине XX столетия интерес к свойствам отдельных частиц аэрозолей и потребность в значительно более точном определении их размеров стимулировали разработку оптических счётчиков частиц – фотоэлектрических приборов, определяющих количество частиц, прокаченных через измерительный объём прибора, путём подсчёта и анализа величины импульсов света, рассеянного уже не ансамблем, а отдельными частицами при пролёте через световой луч.

Появление фотоэлектрического счётчика (спектрометра) частиц аэрозолей как измерительного прибора следует, по-видимому, датировать 1947 г., когда Ф. Гаккер (F. Gucker) с сотрудниками описали фотоэлектрический прибор, созданный для проверки эффективности действия противогазов. Прибор был создан по схеме, предложенной в 1941 г. В. Ламером

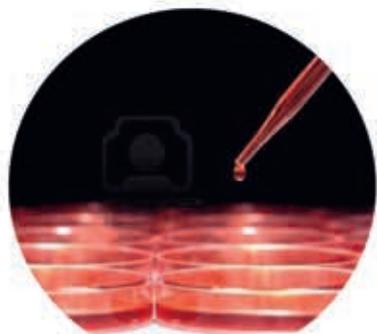
и Д. Синклером и основанной на измерении рассеяния аэрозольными частицами света от источника белого света. В этом случае размер частиц определяют при их последовательном прохождении через освещенный объем, измеряя количество света, рассеянного каждой частицей в некотором телесном угле. Информация о скорости потока и количестве частиц, подсчитанных в единицу времени, позволяет установить концентрацию аэрозоля, а количество света, рассеянного одной частицей, указывает на её размер. Этот метод дает возможность измерять как счетную концентрацию, так и распределение частиц аэрозоля по размерам [3, 12].

Несмотря на изящность и удобство схемы Ламера и Синклера оптические счетчики единичных частиц нельзя использовать для измерения высоких концентраций частиц аэрозолей. Было показано, что при наличии большого количества мелких частиц в освещенном чувствительном объеме приборов данного типа ошибки в измерениях появляются вследствие считывания детектором нескольких частиц как одной, что приводит к занижению концентрации частиц и завышению их размера. Таким образом, существует верхний предел концентрации аэрозоля, который можно измерить данным прибором. Он составляет $10^3 - 10^4$ частиц/см³ [3].

Несмотря на те значительные преимущества, которые получили в результате исследователи (возможность измерения функции распределения частиц по размерам, высокая точность определения размеров и счетной концентрации, неплохая чувствительность), фотоэлектрические приборы такого типа с трудом теснили своих интегральных фотометрических «конкурентов» в практических измерениях. Это объяснялось (прежде всего) необходимостью использования источников света высокой яркости, часто нуждавшихся в охлаждении, сложных оптических систем, коллимировавших световые пучки, большими габаритами фотоэлектрических приёмников света. Тем не менее в 60-х годах в промышленно развитых странах счётчики аэрозолей начали выпускаться серийно.

Однако подлинный бум в разработке, промышленном выпуске и применении фотоэлектрических аэрозольных приборов начался с 70-х годов – времени широкого практического использования лазеров. Высокая плотность мощности излучения, коллимированный пучок, практически не требовавший предварительного (до фокусировки в рабочий объём) формирования, сравнительно небольшие размеры излучателя – всё это позволило добиться в лазерных счётчиках аэрозолей упрощения (а иногда и полной ликвидации) осветительной оптической системы, снизить уровень посторонних засветок и выиграть в чувствительности приборов. В настоящее время лазерные счётчики аэрозолей, измеряющие светорассеяние от отдельных частиц, являются наиболее распространенными (и информативными) приборами в практике измерения размеров аэрозолей.

Сегодня кроме наиболее распространенных оптических счётчиков частиц аэрозолей в воздухе для



Cleanroom Instruments

| авторизованный сервис-центр | калибровка и ремонт |
| проектирование и валидация систем мониторинга |
| обучение персонала |

- Счетчики аэрозолей
- Системы мониторинга чистых помещений по GMP
- Генераторы аэрозолей
- Визуализация воздушных потоков
- Контроль перепадов давления
- Счетчики частиц в жидкостях
- Контроль общего органического углерода
- Контроль молекулярных загрязнений
- ISO 14644-3

 **LIGHTHOUSE**
WORLDWIDE SOLUTIONS



ООО НПЦ «Клинрум Инструментс»
(499) 196-77-27, 196-75-94
факс: (499) 196-77-27
e-mail: clri@clri.ru

<http://clri.ru>
e-mail: clri@clri.ru

различных прикладных задач существуют и другие промышленно выпускаемые приборы, как например, счетчики частиц в жидкости.

Выработка методологии

К началу 60-х гг. был накоплен достаточный опыт для обобщения полученных знаний и создания стандартов по проектированию и эксплуатации чистых помещений. С некоторой оговоркой можно признать, что первый стандарт для чистых помещений был опубликован ВВС США в марте 1961 года. Тем не менее, основным стандартом, который оказал наибольшее влияние на развитие практики проектирования и эксплуатации чистых помещений и послуживший базой для создания большинства мировых стандартов по чистым помещениям, был федеральный стандарт США 209.

Группа специалистов из лаборатории Sandia, разработавшей концепцию однонаправленного воздушного потока, а также специалистов из промышленных, военных и правительственных организаций США создала в 1963 г. первый федеральный стандарт (FS) 209. Этот стандарт затрагивал как обычные чистые помещения, так и чистые помещения с однонаправленным потоком воздуха. Федеральный стандарт 209 оказал очень большое влияние на проектирование чистых помещений и явился основой для появившихся во всем мире стандартов в этой области. В этом стандарте впервые было предложено измерять счетную концентрацию аэрозольных частиц размером $\geq 0,5$ мкм с помощью оптических счетчиков частиц, которые уже были коммерчески доступны. Диаметр частиц 0,5 мкм был выбран базовым для федерального стандарта 209 потому, что это был наименьший размер частиц, который реально можно было измерить имевшимися на тот момент счетчиками аэрозольных частиц. Этот стандарт пересматривался в 1966 (209A), 1973 (209B), 1987 (209C), 1988 (209D) и 1992 (209E) годах. В последней версии FS 209E уже использовались метрические единицы объема. В 1999 году ему на смену пришел международный стандарт ISO 14644-1. Несмотря на это, старой классификацией все еще довольно широко пользуются. Во многом это связано с тем, что стандарт FS 209D прост в восприятии и универсален, однако его уже недостаточно для многих областей промышленности [9, 10].

Несмотря на внушительные работы по изучению свойств аэрозолей еще в XIX веке, книг общего характера, которые могли бы служить учебником или введением в эту область, долгое время не было.

Первая по времени, претендующая на эту роль, книга «Clouds and Smokes» В. Гиббса появилась лишь в 20-е гг. XX века. Монография «Smoke» Уайтлоу-Грея и Паттерсона вышла в русском переводе в 1933 г. и была посвящена исключительно работам самих авторов, сыгравшим, правда, большую роль в развитии науки об аэрозолях. В 1934 г. и в 1956 г. соответственно вышли небольшие по объему книги «Schwebstoffe in Gasen» Винкеля и Яндера и «Les

Aerosols» Ави, в которых освещался лишь ограниченный круг вопросов. Наконец в 1955 г. в СССР была издана первая полномасштабная монография «Механика аэрозолей» Н.А. Фукса [4], ставшая фактически первой полноценной книгой по аэрозолям в мире. «Механика аэрозолей» стала классической, была переведена на множество языков, в том числе и на английский в 1964 г. издательством Пергамон Пресс.

В 1968 г. появилась монография «Particulate Clouds: Dusts, Smokes, and Mists» («Аэрозоли – пыли, дымы и туманы») Х. Грина (H. L. Green) и У. Лейна (W.R. Lane) [2], также ставшая настольной книгой для многих специалистов по аэрозольной тематике.

Стоит также отметить книги «Аэрозоли. Введение в теорию» Паркера Райста (Parker C. Reist «Introduction to Aerosol Science» [3], изданную в 1984 г. (на русском языке издана в 1987 г.), и «Поглощение и рассеяние света малыми частицами» Крейга Борена и Дональда Хафмена (Craig F. Bohren, Donald R. Huffman «Absorption and Scattering of Light by Small Particles» [13], увидевшую свет годом ранее (на русском языке издана в 1986 г.). Если вторая из этих книг посвящена исключительно вопросам поглощения и рассеяния света в жидкой и газовой средах, то первая книга примечательна тем, что была написана по материалам курса лекций, которые автор читал для аспирантов Университета штата Северная Каролина в течение 15-ти лет, и является систематическим изложением знаний об аэрозолях, т.е. учебником. Тем не менее, с распространением технологии чистых помещений потребность в новом, современном учебнике, посвященном аэродисперсным системам, велика как никогда, и появление такой книги значительно облегчило бы подготовку специалистов в этой области.

Литература и ссылки

1. Петрянов-Соколов И.В., Сутугин А.Г. Аэрозоли. – М.: «Наука», 1989.
2. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы: Пер. с англ. – Л.: изд. «Химия», 1969.
3. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: изд. «Мир», 1987.
4. <http://www.iara.org/AerosolPioneers.htm>
5. Kirsch A., Kirsch V. Nikolai Albertovich Fuchs. <http://www.iara.org/newsfolder/pioneers/2AerosolPioneerEditedAugNAFuchs.pdf>
6. <http://www.nifhi.ru/ru/subdivision/aerosol/default.aspx>
7. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М.: изд. АН СССР, 1955.
8. Hidy, George M. Aerosols, An Industrial and Environmental Science. Academic Press, 1984.
9. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации: Пер. с англ. – М.: изд. «Клинтрум», 2002, с. 9-32.
10. Проектирование чистых помещений, под ред. В. Уайта. М.: изд. «Клинтрум», 2004, с. 9-15.
11. http://rikvandervelden.nl/actueel_en.php#
12. Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И. Опико-электронные методы изучения аэрозолей. – М.: Энергоиздат, 1981, с.25, 102-103.
13. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. ■