

А.И. Пирумов

Обеспыливание воздуха

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 528
ББК 38.2
А11

А11 **А.И. Пирумов**
Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов – М.: Книга по Требованию, 2024. – 210 с.

ISBN 978-5-458-25587-5

ISBN 978-5-458-25587-5

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

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

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

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Выбросы пыли в атмосферу увеличиваются по мере роста промышленного производства. Особенно опасных размеров достигло загрязнение воздуха в 50-е годы, когда валовые выбросы пыли и золы отдельными предприятиями стали исчисляться сотнями и тысячами тонн [7, 37, 70]. Катастрофический рост загрязнения воздуха в этот период был обусловлен резким несоответствием между развитием промышленного производства и техники очистки, в частности техники обеспыливания воздуха, которая была не в состоянии решить проблемы, поставленные перед ней промышленностью. В дальнейшем техника обеспыливания получила значительное развитие, и рост загрязнения воздуха в отдельных местностях был приостановлен. Так, если в 1952 г. катастрофический смог в Лондоне привел к гибели 4000 человек, то уже в 1956 г. смог повторился здесь в более слабой форме, и число его жертв снизилось до 1000 человек, а в 1962 и 1967 гг. — соответственно до 700—800 и 300—400 человек [23]; при этом видимость повысилась с 2,5 до 8,5 км.

Однако достигнутые успехи носят в основном местный характер, а в целом загрязненные атмосферы постоянно возрастают. Об этом свидетельствует, например, увеличение ущерба, наносимого загрязнением воздуха в США, с 1,5 млрд. долларов в 1952 г. до 12 млрд. долларов в 1965 г. и до нескольких десятков миллиардов долларов в 1969 г. [72].

В настоящее время Лондон по интенсивности загрязнения воздуха уже не составляет исключения среди других столичных и больших городов мира — в Нью-Йорке в 1963 г. от аналогичных причин погибло 400 человек, в Токио в 1970 г. от смога пострадало 10 тыс. человек, а в 1971 г. — 28 тыс. человек. В Лос-Анджелесе действует трехбалльная система «воздушных тревог». По тревоге № 1 запрещается пользование некоторыми типами мусоросжигательных печей, сокращается автомобильное движение и т. п. По тревоге № 3 полностью прекращается работа промышленных предприятий и транспорта. В Токио такие воздушные тревоги объявляются 100—150 раз в году, а в Эссене, самом «грязном» городе ФРГ, в некоторых районах периодически приостанавливается автомобильное движение.

Характерно, что уже начинает отчетливо проявляться взаимодействие выбросов различных стран, вызывая необходимость создания международных правовых основ защиты атмосферы.

Борьба с загрязнением атмосферы стала одной из важнейших социальных проблем глобального характера.

В СССР плановое размещение промышленности и более совершенные санитарные нормы смягчают вредные последствия загрязнения атмосферы. Тем не менее и в Советском Союзе борьба с загрязнением воздуха является важной проблемой.

Состояние воздушного бассейна промышленных районов определяется главным образом уровнем развития техники очистки дымовых и других газов промышленных установок. Очистка технологических выбросов — это часть основного производства, которая должна проектироваться одновременно с ним. В данной книге очистка их не рассматривается.

Загрязнение воздуха в промышленных районах, в свою очередь, создало проблему обеспыливания воздуха, подаваемого в помещения системами приточной вентиляции и кондиционирования, с целью защиты от пыли, содержащейся в наружном воздухе, людей, оборудования и отделки помещений, а также теплообменников приточных камер и кондиционеров. Новые аспекты этой проблемы возникли в связи с развитием производств, предъявляющих повышенные требования к чистоте воздуха в помещениях для наиболее ответственных технологических операций, в связи с увеличением масштабов потребления воздуха в производстве кислорода, в газотурбинных и других установках, а также в связи с освоением пустынных и полупустынных районов с малосвязными почвами, где часто возникают пыльные бури.

Второй важной задачей вентиляционной техники является очистка воздуха, удаляемого из производственных помещений с помощью вытяжных (аспирационных) вентиляционных систем. Объем отдельных вентиляционных выбросов и содержание пыли в них, как правило, невелики. Выбросы обычно производятся в течение неполных суток с перерывами и переменной интенсивностью. На общее состояние воздушного бассейна вентиляционные выбросы оказывать значительного влияния не могут, но из-за небольшой высоты расположения над землей, рассредоточенности, большого суммарного объема и, как правило, плохой очистки они сильно загрязняют приземной слой атмосферы.

Весьма актуальными стали также мероприятия по устранению последствий запыленности воздуха в производственных помещениях, в частности очистка спецодежды.

Оборудование, применяемое для обеспыливания воздуха, подразделяют на следующие основные виды (СНиП I-Г. 5-62): 1) воздушные фильтры для очистки от пыли наружного или рециркуляционного воздуха, подаваемого в помещения системами приточной вентиляции и кондиционирования; 2) пылеуловители для улавливания пыли из воздушных выбросов вытяжных (аспирационных) вентиляционных систем.

Разделение оборудования на воздушные фильтры и пылеуловители является несколько условным. Так, имеются пылеуловители, в которых отделение пыли происходит главным образом в результате фильтрации воздуха через пористые слои, например рукавные пылеуловители. Эти пылеуловители часто именуют рукавными фильтрами, подобно тому как электрические золоуловители часто называют электрическими фильтрами, хотя в действительности фильтрации воздуха в них не происходит.

Противоречивость терминологии проистекает из существовавшей ранее разобщенности сфер применения обеспыливающего оборудования разных видов. Однако с течением времени разнородные по конструкции обеспыливающие аппараты, традиционно носящие одинаковые наименования, например электрические фильтры для очистки выбросов и электрические фильтры для очистки воздуха в системах приточной вентиляции, волокнистые тканевые фильтры для очистки выбросов и волокнистые фильтры для кондиционеров и т. п., все чаще стали применять в одних и тех же отраслях народного хозяйства. В этих условиях неточность терминологии создала определенные неудобства, что обусловило необходимость более четкого разграничения двух основных областей применения обеспыливающих аппаратов — очистки выбросов и очистки наружного воздуха, определяющих их конструкцию.

Техника обеспыливания характеризуется большим разнообразием конструкций и форм исполнения обеспыливающего оборудования. Число модификаций фильтров и пылеуловителей настолько велико, что в данной книге приводится описание лишь наиболее распространенных, в первую очередь в СССР, или наиболее интересных по своему устройству и конструктивному решению аппаратов, которые могут быть использованы в вентиляционных системах. При этом не рассматриваются пылеуловители, применяющиеся пока главным образом для очистки технологических выбросов (электрические, пенные, рукавные, Вентури), хотя с течением времени их использование в вентиляционных системах, несомненно, будет возрастать.

Правильное применение средств техники обеспыливания воздуха приобретает особое значение в современных условиях растущего загрязнения атмосферы.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВОЗДУХА

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЫЛЕЙ ПО ИХ ДИСПЕРСНОСТИ

Пыль является одной из разновидностей аэрозолей, т. е. дисперсных систем, состоящих из твердых или жидких частиц (дисперсной фазы), взвешенных в газовой (дисперсионной) среде, а именно аэрозолью с твердыми частицами диспергационного происхождения [110]. Такие частицы образуются при измельчении твердых тел, например при дроблении руд, механической обработке металлов, ветровой эрозии грунтов и т. п.

Аэрозоли с твердыми частицами, образовавшимися в результате объемной конденсации пересыщенных паров, например паров металлов, и при химических реакциях некоторых веществ, находящихся в газообразном состоянии, называют *дымами*. К ним относятся аэрозоли, возникающие при горении, плавке металлов и их сварке, а также при некоторых фотохимических процессах [26].

Аэрозоли с жидкими частицами называют *туманами*.

Иногда аэрозолями называют дисперсные системы с частицами размером менее 10 мкм [97]. Такое определение основывается на том, что для частиц крупнее 5—10 мкм взвешенное состояние не является характерным, во всяком случае в покоящейся воздушной среде.

В инженерной практике, как правило, пылью называют не только среду со взвешенными частицами — аэрозоль, но и сами пылевые частицы различного происхождения, в том числе осевшие (порошки), и это упрощение сохранено в некоторой мере в **дальнейшем изложении**.

Ввиду развитой поверхности многие пыли обладают повышенной взрыво- и огнеопасностью.

Одной из важнейших характеристик пыли является ее дисперсность. Под дисперсностью пыли понимается совокупность размеров всех частиц, составляющих пылевую систему. Она определяет особенности поведения дисперсных систем, а также методы, применяемые при решении пылетехнических задач.

Наглядное представление о сравнительной дисперсности различных пылей можно получить, сопоставляя интегральные кривые распределения массы их дисперсной фазы по размерам частиц. Систему классификации пылей по их дисперсности оказалось возможным создать путем спрямления этих кривых в билогарифмической или вероятностно-логарифмической сетке [76].

Классификационная номограмма, приведенная на рис. 1.1, представляет собой вероятностно-логарифмическую сетку, на

которую штрихпунктирными линиями нанесены границы пяти классификационных групп пылей:

- I — очень крупнодисперсная пыль;
- II — крупнодисперсная пыль (например, мелкозернистый песок для строительных растворов по ГОСТ 8736—67);
- III — среднедисперсная пыль (например, цемент);
- IV — мелкодисперсная пыль (например, кварц молотый пылевидный КП-3 по ГОСТ 9077—59);
- V — очень мелкодисперсная пыль.

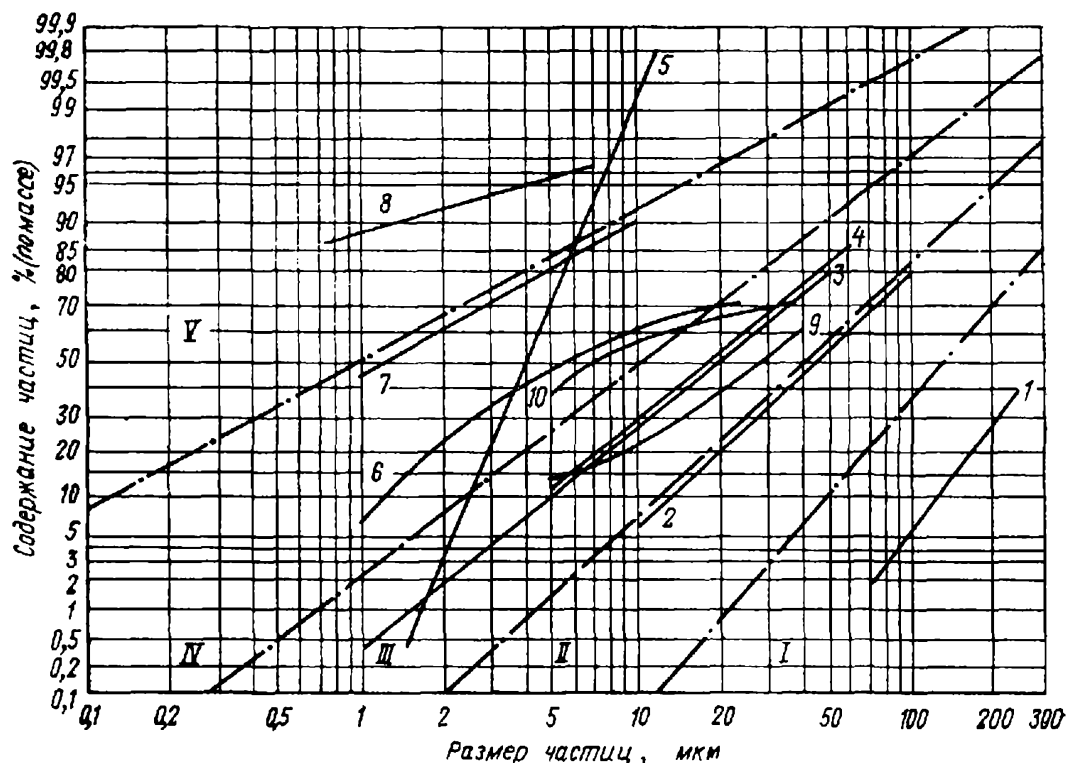


Рис. 1.1. Классификационная номограмма

I — V — классификационные группы пылей по их дисперсности; 1 — уголь, измельченный в шаровой мельнице, 2 — мелкозернистый кварцевый песок; 3 — пылевидный кварц КП-3, 4 — цемент, 5 и 6 — пыли, применяемые при испытаниях лабораторией ЦНИИПромзданий, 7 — дым марганцовых песчей, 8 — атмосферная пыль; 9 — стандартная испытательная пыль «Аризона-крупная» (США), 10 — то же, «Аризона мелкая»

Расположение кривой в той или иной зоне номограммы означает принадлежность данной пыли к соответствующей классификационной группе¹.

Кривые распределения иногда имеют несколько максимумов, принимая вид ломаных линий, или располагаются несимметрично относительно границ классификационной группы. Тем не менее определение группы пыли по дисперсности, как правило, не вызывает особых затруднений.

¹ С 1962 г. номограмма с использованием билогарифмической сетки включена в главу СНиП I-Г.5-62.

Пылевые частицы находятся в непрерывном движении относительно среды, в которой они взвешены. Знание законов, определяющих их взаимодействие с этой средой, важно для решения технических задач.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ С ВОЗДУШНЫМИ ПОТОКАМИ

Движение частиц в прямолинейном потоке. Законы, определяющие движение частиц в покоем воздухе, или, что то же, законы их обтекания воздухом, зависят от размеров частиц.

Аэродинамическое сопротивление частицы диаметром d , движущейся со скоростью v_c относительно воздуха плотностью ρ_v , выражают формулой

$$F = \psi \frac{\pi d^2}{4} \rho_v \frac{v_c^2}{2}. \quad (1.1)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления ψ зависит от числа Рейнольдса Re .

При движении с малыми скоростями и очень небольших размерах частиц, когда $0 < Re < 1$, $\psi = 24/Re$, а сопротивление определяется формулой Стокса¹,

$$F = 3 \pi \mu_v d v_c. \quad (1.1a)$$

В тех случаях, когда исследуется движение, характеризующееся заведомо большими значениями Re , для определения коэффициента аэродинамического сопротивления применяют формулу Л. С. Клячко [48]:

$$\psi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{3\sqrt{Re}}. \quad (1.2)$$

В интервале $3 < Re < 400$ эта формула дает отклонения от действительных значений не более 2%, при $Re = 1000$ погрешность составляет около —4%, а при $Re = 0,1$ — около 4%.

Пылевые частицы оказывают друг на друга механическое и аэродинамическое воздействие, выравнивающее скорости их движения. Соприкосновение частиц часто приводит к образованию агрегатов, т. е. к коагуляции пыли, сильнейшим образом изменяющей свойства пылевого облака, вызывая его «старение».

Механизм удержания соприкоснувшихся пылевых частиц чрезвычайно сложен. В наиболее общем случае — при отсутствии электрических сил — он определяется силами молекулярного притяжения. Последние очень малы и быстро убывают по

¹ Условно принимают, что частицы представляют собой идеальные сферы, учитывая дополнительно в случае необходимости влияние их формы. Обычно пренебрегают также той частью сопротивления, которая связана с сообщением движения самой среде при изменениях скорости движения частицы.

мере удаления частиц друг от друга, становясь ничтожно малыми уже при зазоре между ними около 1 мкм [31]. Силы молекулярного притяжения зависят от площади контактирующих поверхностей частиц и, следовательно, от их формы.

Силами, стремящимися разъединить слипшиеся частицы, при отсутствии особых механических воздействий в виде вибрации и т. п. являются сила тяжести частиц и аэродинамические силы. При экспериментах добиться полного разрушения агрегатов из частиц радиусом около 1 мкм в потоке, образующемся в плоской щели шириной 80 мкм, удавалось только при скоростях более 170 м/с [111].

Способность пыли к слипанию зависит в первую очередь от ее дисперсности. Кроме размера частиц большое значение при этом имеют их форма и механические свойства, в основном их пластичность, влияющая на площадь контакта.

Увлажнение пыли приводит к образованию на поверхности отдельных частиц слоя влаги и тем самым увеличивает площадь их контактирующих поверхностей. Способность пылевых частиц к слипанию возрастает также при конденсации паров воды в зазорах между их контактирующими поверхностями, обусловленной действием двойного электрического слоя, образующегося в зоне контакта, и ряда других эффектов.

Движение частиц в криволинейном потоке. Установлено, что формула Стокса (I.1a), полученная для сферы, обтекаемой прямолинейным поступательным потоком, не вполне точно определяет даже сопротивление частицы, оседаящей в горизонтальном потенциальном потоке [75]. При обтекании же сферы криволинейным потоком симметричность линий тока нарушается и проявляется воздействие ряда новых факторов.

Если движение происходит по концентрическим окружностям, а частицы воздуха не вращаются (потенциальный поток), то скорости распределяются по закону площадей:

$$\omega R = k = \text{const.} \quad (\text{I.3})$$

Для определения постоянной k рассмотрим плоское течение в криволинейном канале единичной толщины, образованном двумя концентрическими поверхностями (рис. I.2).

Объемный расход Q потока, протекающего со скоростью ω по каналу, равен:

$$Q = \int_{R_1}^{R_2} \omega dR = \omega_2 R_2 \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

Так как $Q/(R_2 - R_1) = \omega_0$, то

$$\omega = \frac{\omega_0 (R_2 - R_1)}{R \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

или

$$k = \omega R = \frac{\omega_0 (R_2 - R_1)}{\ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (1.4)$$

Во вращающихся потоках реальных вязких газов скорости распределяются по закону, несколько отличающемуся от закона площадей:

$$\omega R^x = \text{const}, \quad (1.3a)$$

при этом значение показателя степени x , согласно измерениям, составляет в различных случаях от 0,5 до 1.

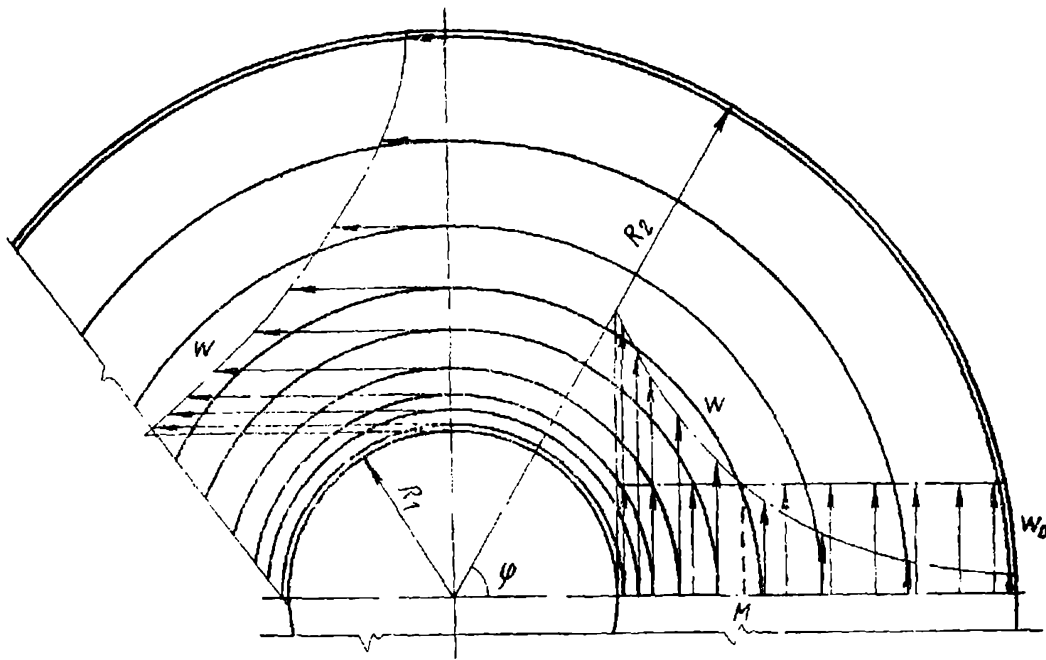


Рис. 1.2. Эпюры скоростей потенциального течения в криволинейном канале

В центре вращающегося потока (ядре вихря) $x = -1$ и скорости распределены как в твердом теле. В этом случае по аналогии с вращательным движением твердых тел постоянная k может быть названа угловой скоростью вращения потока ω . Сопротивление тел, обтекаемых вращающимися потоками при $\omega = \text{const}$, было исследовано Тейлором и Праудманом [75]. Оказалось, что сопротивление сферы радиусом r равно:

$$F = 6\pi r \mu_v v_c - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_v \omega \times (\omega \times R) + \frac{2}{3} \pi r^2 \rho_v (\omega \times v_c). \quad (1.5)$$

Первый член правой части этого уравнения — сила Стокса в ее обычном выражении, а второй и третий члены — дополнительные компоненты аэродинамического сопротивления, обу-

словленные вращением потока. Второй член, по модулю равный $m_B \omega^2 / R$, представляет собой центробежную силу объема воздуха, вытесненного сферой; третий член с модулем $2\pi r^2 \rho_B \omega v_c$ — силу, направленную под прямым углом к вектору скорости относительного движения сферы в сторону вращения потока.

Учитывая, что $2\pi r \omega$ представляет собой циркуляцию Γ относительной скорости по контуру среднего сечения сферы, получим третий член в виде $\frac{1}{3} r \rho_B \Gamma v_c$. Так как величина $\rho_B \Gamma v_c$ представляет собой подъемную силу кругового цилиндра радиусом r , обтекаемого прямолинейным потенциальным потоком со скоростью v_c , можно сделать вывод, что рассматриваемый член уравнения (1.5) — это подъемная сила сферы радиусом r .

С учетом сказанного уравнение (1.5) примет вид

$$F = 6\pi r \mu_B v_c + \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_B \frac{\omega^2}{R} + \frac{1}{3} r \rho_B \Gamma v_c. \quad (1.6)$$

Второй и третий члены этого уравнения очень малы по сравнению с его первым членом, поэтому нет оснований отказываться от применения формулы Стокса и для криволинейных потоков, во всяком случае при движении шарообразных частиц.

Однако теоретические и экспериментальные исследования Тейлора и Праудмана показали также, что при определенных условиях обтекание тел криволинейными потоками может иметь двухмерный характер, в результате чего как сила сопротивления, так и подъемная сила частицы будут значительно больше, чем это следует из формул (1.1а) и (1.6) [75].

Силы инерции. Один из важнейших результатов взаимодействия пылевых частиц с увлекающими их воздушными потоками — это проявление сил инерции.

На инерционной сепарации пыли из воздушных потоков основано устройство большой группы разнообразных «инерционных» пылеуловителей, получивших наиболее широкое распространение в практике обеспыливания: циклонов, жалюзийных пылеуловителей, центробежных скрубберов, ротоклонов и др. В значительной мере силами инерции обусловлены отделение пыли при фильтрации воздуха через пористые слои, осаждение пыли на препятствиях, коагуляция пылевых частиц в поле ультразвуковых колебаний и т. п.

Еще сравнительно недавно природа и существо сил инерции являлись предметом дискуссии [113]. Классическая механика была склонна трактовать силы инерции как фиктивные силы, которые вводятся формально, чтобы можно было применять законы Ньютона при рассмотрении некоторых движений тел.

В свете современных физических представлений различают два класса сил инерции: 1) ньютоновы силы инерции, действующие в инерциальных системах отсчета, т. е. в системах неподвижных или движущихся по отношению к неподвижным прямо-

линейно и равномерно; 2) силы инерции, действующие в неинерциальных системах отсчета, т. е. в системах, движущихся по отношению к неподвижным с ускорением.

Рассмотрим прежде всего ньютоновы силы инерции. Согласно первому закону Ньютона (закон инерции), в инерциальной системе координат каждое уединенное тело, на которое не действуют силы со стороны других тел, может двигаться только прямолинейно и равномерно. Таким можно представить движение пылевой частицы в вакууме, если отвлечься от сил тяготения или допустить, что масса частицы достаточно мала, чтобы можно было на некоторый промежуток времени пренебречь влиянием этих сил, например на искривление ее траектории.

Частица, движущаяся в воздушной среде, испытывает ее воздействие. Согласно второму закону Ньютона, в результате этого воздействия у частицы возникает ускорение относительно неподвижной системы координат и скорость ее движения начинает уменьшаться. Ускорение всегда пропорционально действующей на частицу силе сопротивления среды и по направлению совпадает с направлением этой силы.

Если абсолютная скорость частицы относительно неподвижной системы координат равна v , а скорость воздушной среды (потока) — w , то сила инерции

$$m \frac{dv}{dt} = 3 \pi \mu_B d (w - v), \quad (1.7)$$

или

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\tau} (w - v),$$

где

$$\tau = \frac{m}{3 \pi \mu_B d}. \quad (1.8)$$

В данном случае ускоряющее действие оказывает на частицу воздушная среда. Ускоряющая сила, представленная правой частью уравнения (1.7), приложена к частице.

Согласно третьему закону Ньютона, каждое действие вызывает равное ему и противоположное по направлению противодействие. Ньютонова сила инерции представляет собой силу противодействия ускоряемой частицы и как сила реакции приложена к ускоряющей воздушной среде. Таким образом, действующая сила аэродинамического сопротивления и противодействующая ей сила инерции, характеризующие взаимодействие частицы с воздушным потоком, имеют одну и ту же природу.

Для исследования сил инерции второго класса рассмотрим поведение частицы в потоке, протекающем, например, в конфузорной части трубы пылеуловителя Вентури, в неподвижной системе координат. По мере сужения сечения конфузора скорость