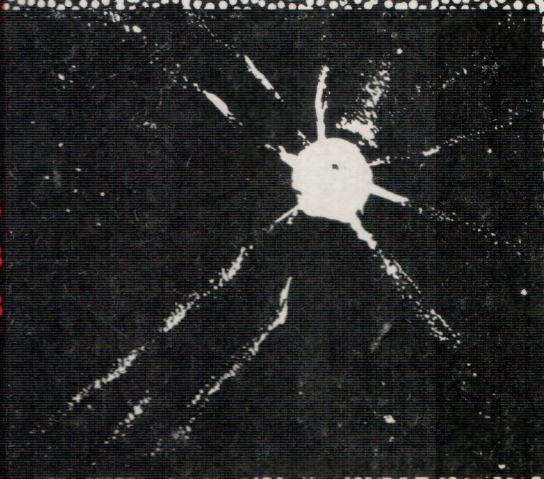


ВЗРЫВООПАСНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

В.В. НЕДИН  
ОДНЕЙКОВ  
А.Г. АЛЕКСЕЕВ  
В.А. РИВЦОВ



**ВЗРЫВООПАСНОСТЬ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
ПОРОШКОВ**

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

В. В. НЕДИН, О. Д. НЕЙКОВ,  
А. Г. АЛЕКСЕЕВ, В. А. КРИВЦОВ

# ВЗРЫВООПАСНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

В книге рассмотрены вопросы образования газодисперсных систем, их воспламенения и горения; рассмотрены методики и результаты экспериментального исследования пирофорности и взрываемости порошков и пылей. Описаны также методики исследования физико-химических свойств порошков и пылей, определяющих их пирофорность и взрывоопасность.

Предназначена для работников порошковой металлургии, занятых производством и применением металлических порошков, специалистов проектно-конструкторских и научно-исследовательских организаций, а также для работников других отраслей промышленности, связанных с образованием взрывоопасных пылей.

Ответственный редактор  
канд. техн. наук *О. С. Ничипоренко*

Рецензенты:  
канд. техн. наук *Н. И. Турута*,  
канд. техн. наук *В. И. Печковский*

В процессе получения и переработки порошков, в частности металлических, могут образовываться газодисперсные системы с твердой фазой из энергично окисляющихся с выделением тепла веществ, способных в определенных условиях воспламениться и взрываться.

В народном хозяйстве Советского Союза многие производства связаны в той или иной мере с получением или переработкой пожаро- и взрывоопасных порошков. Среди таких производств увеличивается удельный вес предприятий порошковой металлургии. Особенно опасна большая группа металлических порошков, отличающихся низкой температурой воспламенения, высокой теплотворной способностью, возникновением больших давлений при взрыве — пыли алюминия, магния, циркония, титана, железа, различных сплавов на их основе и др.

Только самовозгорание промышленных материалов приносит ежегодный материальный ущерб народному хозяйству в десятки миллионов рублей. Следует отметить, что наблюдается тенденция к увеличению числа пожаров [1].

Неизученность взрывоопасности порошков приводит к тому, что многие предприятия по производству новых материалов запроектированы без надлежащих средств защиты. В других же случаях для обеспечения безопасности принимаются излишние меры, приводящие к значительному удорожанию производства.

Для создания взрывобезопасной технологии при производстве и применении порошков необходимо располагать исчерпывающими данными о характеристиках пирофорности и взрываемости. Определение этих характеристик связано с серьезными методическими трудностями. Известные методики имеют существенные недостатки. В связи с тем что работа по их сравнению не проведена, результаты определений характеристик взрываемости во многом разноречивы; это затрудняет использование их на практике. Кроме того, отсутствует вполне установившаяся терминология, что вызывает дополнительные трудности.

В литературе приводятся сведения о характеристиках взрываемости пылей преимущественно органического происхождения. Данных о металлических пылях значительно меньше, к тому же они встречаются лишь в различных периодических изданиях. Книга М. Г. Годжелло «Взрывы промышленных пылей и их предупреждение» была издана в 1952 г. Работы И. В. Рябова, С. И. Таубкина, М. Н. Калгановой не восполняют создавшегося пробела.

Все это побудило авторов написать данную монографию, в которой критически рассмотрены методы оценки пожаро-

и взрывоопасности порошков и приведены результаты исследований.

Очень важно располагать данными о физико-химических свойствах порошков и взвешенных в газе частиц, обуславливающих их активность (дисперсности, концентрации частиц, удельной поверхности, степени окисленности). Поэтому в книге уделено существенное внимание методикам исследования этих свойств, и особенно определению концентрации взвешенных в газе частиц, быстро изменяющейся во времени.

Авторы благодарны сотрудникам Института проблем материаловедения АН УССР, принимавшим участие в проведении исследований.

Под горением металлических порошков, распыленных в газовой среде, понимают быстро протекающую химическую реакцию между металлом и газовой средой, сопровождающуюся выделением тепла и света.

Порошки алюминия, восстановленного железа, магния, циркония, титана, их сплавов, а также других металлов при определенных условиях могут энергично окисляться кислородом (гореть) с выделением тепла. Однако горение может протекать и в отсутствие кислорода. Так, многие металлы горят в хлоре, окись натрия или бария — в углекислом газе.

За последние 15—20 лет в связи с развитием ракетной техники особое внимание уделяется получению твердого высококалорийного топлива путем добавления в горючее металлических порошков. В связи с этим горение металлических порошков исследовали в замкнутых объемах, применительно к камере сгорания, при больших давлениях и температурах [2—16]. Значительно меньше внимания уделялось исследованию горения металлических порошков в воздушной среде при нормальных условиях ( $P=1,0 \text{ кг/см}^2$ ,  $t=20^\circ \text{C}$ ).

Поскольку природа окисления при различных температурах и давлениях одна и та же, целесообразно рассмотреть механизм окисления несколько подробнее.

### МЕХАНИЗМ ОКИСЛЕНИЯ

Природа реакции между металлом и окислителем не зависит от температуры и давления. Скорость же реакции окисления в значительной степени зависит от температуры и в меньшей — от давления.

При коррозии металлов окисление происходит медленно, более быстро — при тлении. Последнее характеризуется увеличением скорости диффузии окислителя, которая при повышении температуры может приводить к кипению материала частицы с последующим механическим разрушением окисной пленки или ее плавлению.

По вопросам коррозии металла и борьбе с ней накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал. Наи-

более важные сведения по окислению порошков опубликованы в работах [17—33]. Рассмотрим процесс медленного окисления [21].

Взаимодействие кислорода с чистой поверхностью неокисленной металлической частицы, очевидно, происходит таким же образом, как и со сплошным неокисленным металлом. Следовательно, механизм процесса медленного окисления металлических порошков можно представить в такой последовательности: 1) адсорбция, 2) образование зародыша окиси металла; 3) рост сплошной окисной пленки.

На первой стадии за физической адсорбцией молекулярного кислорода следует хемосорбция атомарного кислорода с образованием слоя, для которого характерна прочная химическая связь. Экспериментальные данные [21] по дифракции медленных электронов показывают, что, например, в случае никеля определенное количество атомов металла перемещается в плоскость адсорбированных атомов кислорода, образуя стабильную структуру, которая настолько прочна, что сохраняется даже при температуре плавления металла.

При непрерывном воздействии кислорода на металл в нормальных условиях ( $P=1,0$  кг/см<sup>2</sup>,  $t=20^\circ$  С) наблюдается быстрый рост зародышей окисла металла до определенной толщины. Электронный переход на границе металл — окисел ограничивает толщину окисной пленки, но вместе с тем он же и обуславливает преимущественный рост зародыша, который продолжается до образования сплошной пленки. Рост сплошной пленки подчиняется логарифмической зависимости. Уменьшение скорости окисления обусловлено наличием в окисной пленке отрицательного пространственного заряда, который замедляет процесс электронного перехода. Устойчивый хемосорбированный монослой кислорода — атом металла сохраняется в течение всего времени роста сплошной окисной пленки.

Механизм взаимодействия между чистой поверхностью металла и газообразным кислородом при обычных и повышенных температурах весьма сложен и в достаточной степени не изучен. Это отмечалось в некоторых докладах на III Международном конгрессе по коррозии металлов в 1966 г. [33].

В работах [23—32] приведены данные по изучению окисной пленки и ее роста в зависимости от давления, температуры и состава газовой и жидкостной среды. Гульбрансен и сотрудники исследовали рост окисных пленок железа [23], алюминия [24], бериллия [25], вольфрама и магния [26], тантала [27], титана и циркония [28] при пониженных давлениях и температуре ниже температуры воспламенения. Исследованию окисления алюминия, магния, бериллия и никеля в воздухе и в кислороде при атмосферном давлении и температуре, близкой к температуре воспламенения, посвящены работы [29—31].

В работе [32] приводится зависимость скорости образования окисной пленки от температуры в виде экспоненциального уравнения Аррениуса

$$K_A = A e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (I.1)$$

где  $A$  — коэффициент, определяемый экспериментально;  $E_a$  — энергия активации металла;  $T$  — абсолютная температура, при которой происходит окисление;  $R$  — газовая постоянная.

Величины энергии активации в указанных интервалах температур следующие:

Металл	Температура, °С	Энергия активации, ккал/моль
Алюминий	350—475	22,8
Бериллий	350—950	50,3
Тантал	250—450	27,4
Титан	350—600	26,0
Цирконий	200—425	18,2

При производстве металлических порошков в условиях, близких к нормальным ( $P=1,0$  кг/см<sup>2</sup>,  $t=20^\circ$ С), в большинстве случаев процесс окисления происходит сразу же после их получения. Окисление порошков при повышенных температурах и давлениях может быть активным и даже сопровождаться горением.

## ИСКРЕНИЕ И ВСПЫШКА

При небольшой концентрации металлического порошка в воздушной среде или при недостаточной мощности энергии воспламенителя (инициатора) может происходить искрение. Ему, очевидно, подвержены прежде всего наиболее мелкие частицы, которые достаточно быстро прогреваются на всю глубину.

При малой концентрации порошка в воздушной среде даже при довольно большой мощности воспламенителя (искре, нагретом теле) может наблюдаться искрение отдельных частиц без горения газодисперсной системы в целом. Очевидно, суммарная энергия, выделяющаяся при искрении частиц, расходуется на нагрев газа и частиц, и потому плотность такой энергии в единице объема газодисперсной системы небольшая. Этой энергии, конечно, недостаточно для зажигания металлических частиц, значительно удаленных от воспламенителя.

Частицы, находящиеся вблизи воспламенителя, могут при искрении как бы объединяться и давать вспышку. Эта вспышка



(или местное воспламенение) не будет распространена на значительную часть объема газодисперсной системы из-за малой концентрации металлического порошка.

При концентрации твердой фазы, необходимой для воспламенения, также может происходить вспышка. В этом случае, если мощность воспламенителя (искры, нагретого тела) недостаточна для воспламенения соответствующего объема газодисперсной системы, необходимого для развития горения, то вблизи воспламенителя можно наблюдать искрение и вспышку. Интенсивность выделения энергии в единице объема в области вспышки оказывается недостаточной для зажжения находящихся вблизи металлических частиц. Эти частицы получают тепловую энергию, которая расходуется на окисление частиц и в конечном счете на увеличение толщины окисной пленки.

## Воспламенение

Для воспламенения распыленных в воздухе металлических частиц (т. е. чтобы начался процесс прогрессивного окисления с появлением пламени) необходимо частицы и окислитель разогреть до определенной температуры либо сообщить достаточное количество энергии этой системе в виде искры или другого инициатора.

Под воспламенением следует понимать процесс появления пламени в значительном объеме газодисперсной системы. Воспламенение газодисперсной системы путем зажжения заключается в поджиге смеси в одной точке пространства нагретым телом, искрой, пламенем и т. д. При этом образовавшееся пламя распространяется на весь объем смеси. Если в небольшом объеме возникло пламя, которое дальше не распространилось, то это вспышка, а не воспламенение.

Когда же при определенных условиях в газодисперсной системе появилось пламя практически одновременно по всему объему, такое воспламенение называют самовоспламенением. Очевидно, самовоспламенению предшествует процесс гомотермического разогрева газодисперсной системы по всему объему.

Самовоспламенение обусловлено протеканием процессов с такой скоростью, при которой количество выделяющегося тепла больше количества тепла, рассеивающегося в окружающую среду.

Процессу воспламенения газовых смесей посвящены многочисленные исследования, тогда как работ по изучению воспламенения газодисперсных систем очень мало. Среди исследований в области воспламенения газовых смесей наибольший интерес в связи с рассматриваемыми здесь вопросами представляют работы [35—40].

Для воспламенения газодисперсной системы требуется некоторое время для разогрева среды и определенное количество энергии. Рассмотрим эти два фактора несколько подробнее.

### Энергия воспламенения

Минимальную, выделяемую инициатором, энергию, необходимую для воспламенения газодисперсной системы, принято называть минимальной энергией воспламенения.

Определению минимальной энергии воспламенения посвящены экспериментальные работы [43, 44]. В работе [43] измеряли энергию воспламенения распыленных в воздухе порошков алюминия и магния.

В качестве воспламенителя использовали электрическую искру, возникавшую между двумя электродами. Регулируя расстояние между электродами, соответственно изменяли и сопротивление. Изменяемыми параметрами были энергия разряда и разрядное сопротивление.

В результате проведенных экспериментов [43] установлено: энергия воспламенения зависит от сопротивления; существует минимальная величина энергии при вполне определенном разрядном сопротивлении; минимальная энергия воспламенения является функцией размера частиц. Результаты экспериментов представлены на рис. 1 и в табл. 1.

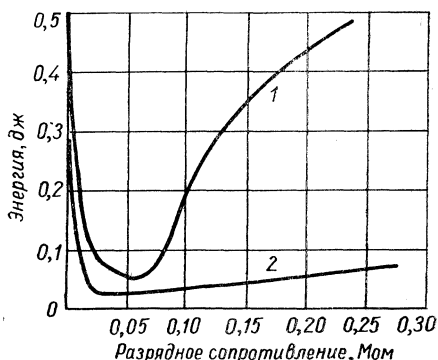


Рис. 1. Влияние разрядного сопротивления на минимальную энергию воспламенения порошков алюминия (1) и магния (2), распыленных в воздухе.

Таблица 1

Сопротивление, <i>ом</i>	Минимальная энергия воспламенения, <i>дЖ</i>				
	магния			алюминия	Mg (50%) — 90 <i>мк</i> Al (50%) — 10 <i>мк</i>
	90 <i>мк</i>	70 <i>мк</i>	40 <i>мк</i>	10 <i>мк</i>	
$5 \cdot 10^4$	0,20	0,033	0,025	0,055	0,060
$5 \cdot 10^6$	1,20	0,14	0,09	0,55	0,80

Авторы работы [43] уточняют дисперсный состав, в связи с чем не представляется возможным проанализировать полученные ими данные.

Воспламенение газодисперсной системы обусловлено в основном наличием частиц минимальных размеров в достаточной концентрации.

С увеличением сопротивления (соответственно продолжительности искры) энергия расходуется на нагревание большего объема частиц и воздуха. При весьма больших сопротивлениях искровой источник становится тепловым.

Т а б л и ц а 2

Источник воспламенения	Концентрация частиц, мг/л воздуха	
	алюми- ния	угля
Тлеющий разряд	7,0	17,2
Дуга	7,0	24,1
Индукционная искра	13,7	Не воспла- меняется

В работе [44] приводятся данные по воспламенению порошков титана, циркония, урана и их гидридов. Величины энергий воспламенения для этих веществ колеблются в пределах 3—200 мдж. Определена максимальная концентрация порошка, меньше которой воспламенение, а следовательно, и горение, не могут распространяться по объему. Это и

есть нижний концентрационный предел (н. к. п.) \*.

Весьма важной характеристикой взрываемости является восприимчивость газозвеси к различным инициаторам, но этому вопросу исследователи еще не уделили должного внимания. Известна только работа [64], данные которой характеризуют чувствительность газозвеси порошков, алюминиевого и угольного, к воспламенению от трех видов воспламенителей (табл. 2). Однако в работе не приводятся данные о дисперсном составе и не описаны методики проведения опытов.

### Время разогрева частицы до ее воспламенения (период индукции)

Время разогрева металлической частицы до момента ее воспламенения зависит от многих факторов, и прежде всего от природы материала частицы и ее размеров. Частица малых размеров при прочих равных условиях прогревается быстрее крупной и потому воспламеняется раньше.

На время разогрева частицы до ее воспламенения влияют

\* За нижний концентрационный предел взрываемости аэрозвеси принимается минимальная концентрация, при которой в случае начального воспламенения группы частиц процесс горения распространяется в аэрозвеси самостоятельно.

начальная температура и давление среды, природа источника воспламенения (искра, нагретое тело, пламя и т. д.), теплопроводность межчастичной среды и самих частиц, наличие кислорода (его концентрация и энергия связи атомов кислорода в молекулах химических соединений), диффузия кислорода и т. д.

Экспериментальное определение времени разогрева отдельной частицы до момента ее воспламенения и определение темпе-

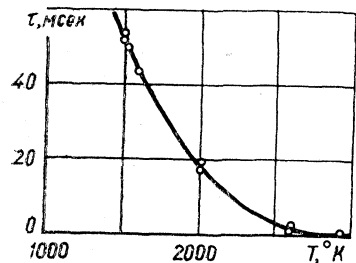


Рис. 2. Зависимость времени индукции частиц алюминия диаметром 70 мк от температуры газовой среды.

Таблица 3

Порошок	Температура воспламенения порошка, °С	
	распыленного в воздухе	осевшего (покоящегося)
Алюминий	645	585
Магний крупный	790	560
Магний мелкий	540	480

ратуры воспламенения приведены в работах [2, 63], которые посвящены результатам исследования повышения калорийности твердого топлива ракет за счет добавок металлических частиц. Время разогрева отдельной частицы определялось от момента введения ее в газовую высокотемпературную среду, содержащую кислород, до момента воспламенения.

Авторы работы [2] определяли время разогрева отдельной частицы до ее воспламенения в зависимости от температуры газового потока. На рис. 2 представлена графическая зависимость времени разогрева в интервале температур 1600—3000° К одиночной частицы алюминия диаметром 70 мк до ее воспламенения. Из графика следует, что по мере снижения температуры газового потока время разогрева алюминиевой частицы возрастает. Такая же картина наблюдается и для частиц других диаметров.

На основании проведенных экспериментов [2] получена эмпирическая формула для определения времени разогрева алюминиевых частиц до их воспламенения, применительно к условиям проведения данных опытов:

$$\tau = 3,6 \cdot 10^{-6} d^2 \exp \frac{32000}{RT}, \quad \text{мсек}, \quad (1.2)$$

где  $d$  — диаметр частиц от 5 до 140 мк.

Кроме того, установлено, что на время разогревания частиц алюминия до их воспламенения состав окисляющей среды и давление существенно не влияют, но в сильной степени, как следует из формулы (1.2), влияет температура и диаметр частиц.

В работе [44] приводятся результаты экспериментов по измерению температуры воспламенения металлических порошков. Установлено, что осевшие на металлическую поверхность частицы воспламеняются при более низкой температуре, чем те же порошки, взвешенные в воздухе (табл. 3).

Объясняется указанный факт тем, что частицы, находясь в неодинаковых условиях, поглощают тепло с различной скоростью. Температура стенки несколько выше температуры воспламенения частиц, но ниже температуры среды с распыленным в ней порошком. Это вызвано тем, что теплопроводность металла (стенки) выше теплопроводности воздуха, поэтому осевшие частицы нагреваются быстрее и воспламеняются при более низкой температуре.

### МЕХАНИЗМ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ

Механизм воспламенения металлической частицы весьма сложен и поэтому еще далеко не изучен.

Обычно принимают, что воспламенение наступает при достижении частицей температуры плавления ее окисной пленки. (Температура плавления окисной пленки для большинства металлов выше температуры плавления вещества самой беспленочной частицы.)

Исследованию механизма воспламенения и горения посвящены экспериментальные работы [3, 4, 8, 10]. На результатах некоторых из них необходимо остановиться.

В общих чертах методика проведения экспериментов заключалась в следующем: металлические частицы вводили в газовую высокотемпературную среду с известным газовым составом, температурой и давлением и с помощью оптических приспособлений и кинокамер наблюдали за их поведением. Высокотемпературная газовая среда может быть создана в герметичной бомбе либо в кислородно-водородной горелке и т. д.

В работе [8] приводятся результаты экспериментальных исследований при введении сферических частиц алюминия в поток горячих газов, генерируемых горелкой. Частицы фотографировали в различные моменты после их введения. Для исследования формы частиц, выявления особенностей механизма воспламенения и горения частицы процесс прерывали.

Гашение частицы оказалось возможным на различных стадиях ее воспламенения и горения. Для гашения частиц в пламя

горелки вводили трубку с гелием. Воспламенившиеся частицы, попадая в трубку, быстро гасли и опускались на ее дно.

В результате экспериментов с алюминиевыми частицами диаметром 70 мк оказалось, что при гашении первоначальная частица выбрасывает поток сферических частиц диаметром примерно 5 мк. Авторы предполагают, что эти мелкие частицы представляют собой окись металла (рис. 3—6, см. вклейку).

На рис. 4 видны погашенные частицы, находившиеся в пламени, но вне зоны воспламенения. Такие четкие следы наблюдались только внутри зоны кислородно-водородного пламени и не были видны при гашении их на воздухе. При детальном рассмотрении винтового следа оказалось, что он состоит из множества сферических частиц. При этом хвостовая часть следа состоит из частиц больших диаметров, что свидетельствует о более раннем их происхождении. Частицы, находящиеся вблизи исходной частицы, имеют меньшие размеры, что говорит об их позднем происхождении.

При ударе сферических частиц алюминия о преграду в зоне пламени они дробятся, выбрасывая следы в различных направлениях. Следы состоят из группы более мелких частиц (рис. 5 и 6). При гашении частиц таких же размеров в атмосфере воздуха дробления не наблюдали.

С помощью высокоскоростной съемки установлено [8], что частицы неправильной формы перед воспламенением всегда становятся сферическими.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Теоретические исследования воспламенения металлических частиц как у нас, так и за рубежом немногочисленны. Изучению воспламенения углерода посвящено значительно больше работ. Из зарубежных необходимо упомянуть работу Нуссельта [45].

Рассматривая сферические угольные частицы, взвешенные в воздухе, при некоторых допущениях Нуссельт вывел уравнение, определяющее скорость поглощения тепла. Суть его решения заключается в следующем. Тепло, поглощенное отдельной частицей, равно разности между теплом, полученным в результате излучения от стенок камеры, в которой происходит сгорание частицы, и теплом, отдаваемым частицей газу путем теплопроводности:

$$\left(\frac{4}{3}\pi r^3 C_p \frac{dT}{d\tau}\right)_p = \Phi k \left[ \left(\frac{T_w}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_p}{100}\right)^4 \right] 4\pi r_p^2 - 4\pi r_p K (T_p - T_0), \quad (1.3)$$

где  $p, w, 0$  — индексы, относящиеся к частице, стенке камеры сгорания, начальным условиям соответственно;  $r$  — радиус

частицы;  $\varphi$  — коэффициент углового диаметра излучения;  $k$  — постоянная Больцмана;  $K$  — теплопроводность воздуха;  $\rho$  — плотность материала частицы;  $C$  — удельная теплоемкость частицы.

Поскольку  $T_w^4 \gg T_p^4$ , пренебрегая  $T_p^4$  и интегрируя уравнение (I.3) с начальными условиями при  $\tau=0, T_p=0$ , Нуссельт получил зависимость температуры частицы от основных параметров, т. е. от температуры стенки камеры, радиуса частицы и времени нагревания частицы:

$$T_p = T_0 + \frac{\varphi k r_p}{K} \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 (1 - e^{-\frac{3K}{C \rho r_p^2} \tau}). \quad (I.4)$$

При  $\tau \rightarrow \infty$  формула (I.4) примет следующий вид:

$$T_p = T_0 + \frac{\varphi k r_p}{K} \left( \frac{T_w}{100} \right)^4. \quad (I.5)$$

Из уравнения (I.5) следует, что температура частицы прямо пропорциональна радиусу частицы, интенсивности излучения и обратно пропорциональна теплопроводности воздуха, а формула (I.4) показывает, что с увеличением времени температура частицы быстро повышается.

Для получения приближенной формулы, которая бы учитывала быстрый рост температуры за малый промежуток времени, можно ограничиться двумя членами разложения экспоненциальной зависимости (I.4) в ряд. В таком случае формула принимает вид:

$$T_p = T_0 + \varphi k \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \frac{3\tau}{C \rho r_p}. \quad (I.6)$$

Приведенная формула показывает, что вначале, когда  $\tau$  мало, скорость нагрева частицы обратно пропорциональна ее радиусу и не зависит от теплопроводности воздуха. Из этого следует, что частицы малых диаметров прогреваются быстрее, чем крупные. Следовательно, малые частицы достигают температуры воспламенения раньше крупных и поэтому (при достаточной их концентрации) практически определяют температуру воспламенения газодисперсной системы.

Приближенное теоретическое определение Нуссельтом скорости поглощения тепла частицей, несмотря на многочисленные критические замечания, получило всеобщее признание. Критические замечания сводились к следующему: Орнинг [46] указал, что, учитывая теплопроводность воздуха, окружающего частицу, следует учитывать и его объем.

Нуссельт предполагал теплопроводность материала частицы бесконечно большой, т. е. температуру в каждой точке объема частицы в любой момент времени постоянной. В действительности это не так.

Внешнее давление, по Нуссельту, не влияет на скорость нагревания частицы. В действительности при увеличении давления

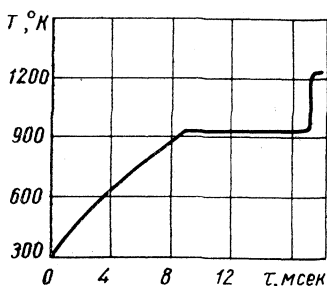


Рис. 7. Кривая разогрева частицы магния диаметром 45  $\mu\text{к}$  в воздухе при температуре среды 1123° K.

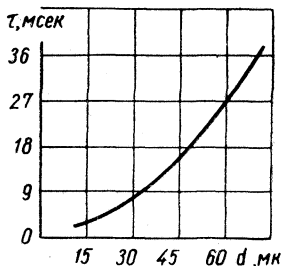


Рис. 8. Зависимость времени индукции частиц магния в воздухе от диаметра при температуре среды 1123° K и относительной концентрации кислорода 23%.

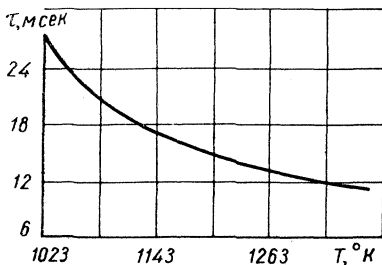


Рис. 9. Зависимость времени индукции частицы магния диаметром 45  $\mu\text{к}$  в воздухе от температуры среды при относительной концентрации кислорода 23%.

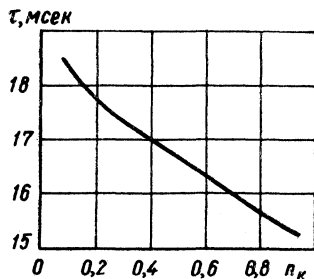


Рис. 10. Зависимость времени индукции частицы магния диаметром 45  $\mu\text{к}$  от концентрации кислорода в кислородоазотной среде при температуре 1123° K.

скорость прогревания частицы уменьшается, так как при увеличении давления потери тепла увеличиваются, а излучение, вызывающее нагрев частицы, не изменяется.

Материалы теоретических исследований, проведенных в Советском Союзе, опубликованы в [47—53].

В работе [53] рассматривается разогрев частицы металла в газовой среде, содержащей кислород, до момента ее воспламенения. Допускается, что процессы тепло- и массообмена частицы с газовой средой протекают квазистационарно и что реакция



взаимодействия металла с кислородом происходит на поверхности частицы. Концентрация паров металла, концентрация кислорода и распределение температур вблизи частицы описываются системой дифференциальных уравнений шестого порядка.

При определенных граничных условиях решение системы уравнений проводилось на электронно-вычислительной машине «Урал-2». С помощью комбинаций входных параметров были получены интересные результаты (рис. 7—10).

На рис. 7 представлена кривая разогрева частицы магния диаметром 45 мк в воздухе при температуре среды 1123° К. Через 17 мсек разогрева частица должна воспламениться. За момент воспламенения металлической частицы было принято начало режима диффузионного горения.

Из рис. 8 следует, что с увеличением диаметра частицы время индукции прогрессивно возрастает. С повышением температуры время индукции уменьшается, но степень этого уменьшения в различных температурных диапазонах — различная (рис. 9). С увеличением концентрации кислорода ( $n_k$ ) время индукции также уменьшается (рис. 10). Однако степень уменьшения времени индукции значительно меньше степени возрастания соответствующей концентрации. При повышении концентрации в два раза (в диапазоне 40 и 80%) время индукции уменьшается всего на 8%.

## ГОРЕНИЕ

Природа горения весьма сложна. Сложность ее обусловлена сочетанием химических и физических процессов: механическим смешиванием компонентов, наличием, как правило, нестационарного теплообмена, гидродинамических, а иногда и газодинамических явлений и т. д.

В зависимости от природы компонентов, участвующих в реакции, различают два вида горения: гомогенное и гетерогенное. Гомогенное горение — это реакция горения газовых смесей; гетерогенное — реакция горения газа и твердых или жидких компонентов.

Гомогенное горение изучено достаточно полно. Большой вклад в изучение этого процесса внесен советским ученым Н. Н. Семеновым и его учениками. Основные результаты исследований представлены в работах [35, 37, 38, 54—69].

Большой вклад в разработку теорий гетерогенного горения в Советском Союзе вложили А. С. Предводителей, А. Ф. Беляев, М. А. Гуревич и другие ученые. Значительная часть работ этого направления посвящена исследованию горения жидкого топлива

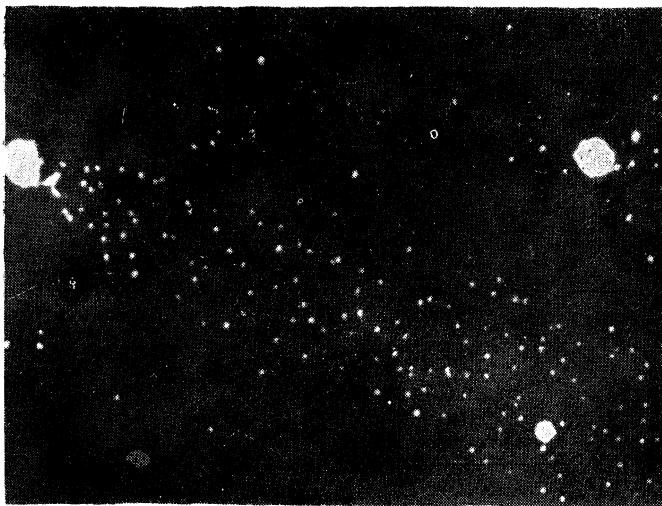


Рис. 3. Ранняя стадия воспламенения алюминиевых частиц диаметром 70 мк.

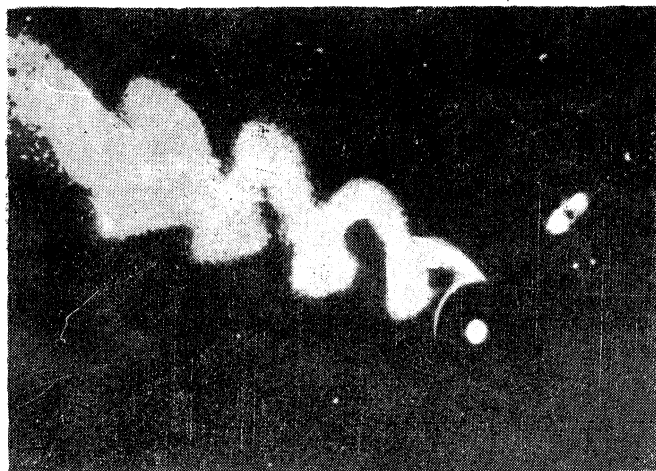


Рис. 4. Погашенные алюминиевые частицы диаметром 70 мк. Одна частица погашена во время горения, другая — во время воспламенения.



Рис. 5. Погашенные алюминиевые частицы диаметром 150 мк в ранней стадии воспламенения.

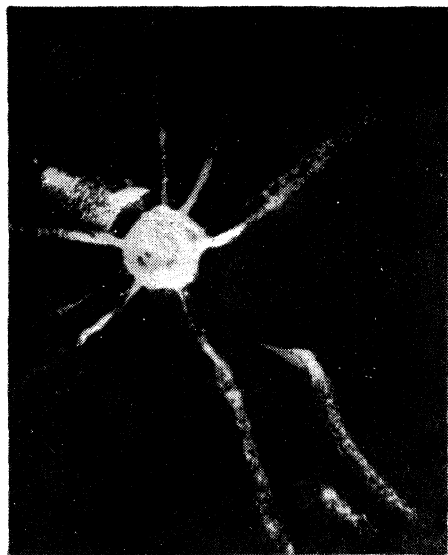


Рис. 6. Дробление алюминиевой частицы диаметром 150 мк при ударе о поверхность в ранней стадии воспламенения.



Рис. 13. Самоподдерживающееся горение в атмосфере разрушенной алюминиевой частицы диаметром 150 мк.



Рис. 14. Часть поллой сферы с находящейся в ней частицей и самоподдерживающееся горение в стадии завершения второй частицы.

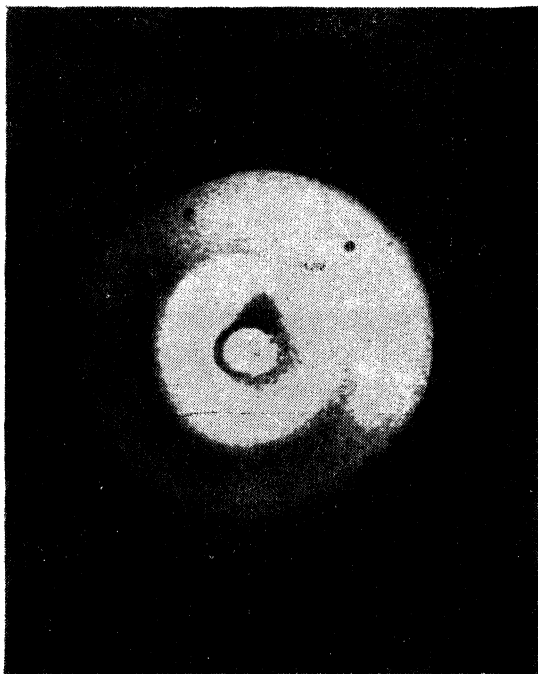


Рис. 15. Самоподдерживающееся горение в атмосфере неразрушенной частицы алюминия диаметром 150 мк.

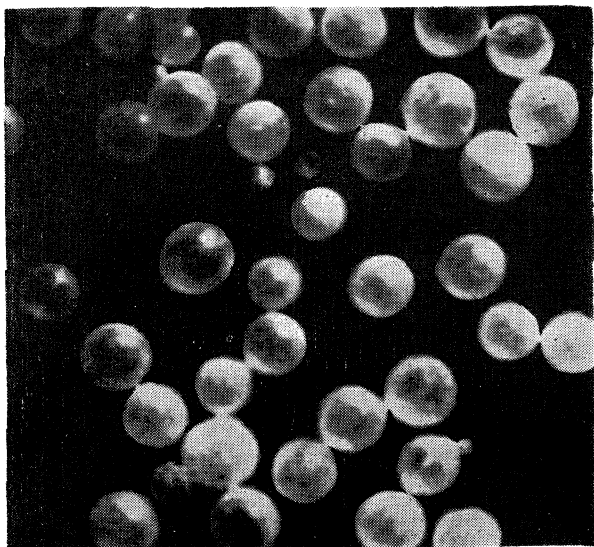


Рис. 16. Полые сферические частицы окиси алюминия диаметром 150 мк, образовавшиеся из сферических алюминиевых частиц диаметром 70 мк.

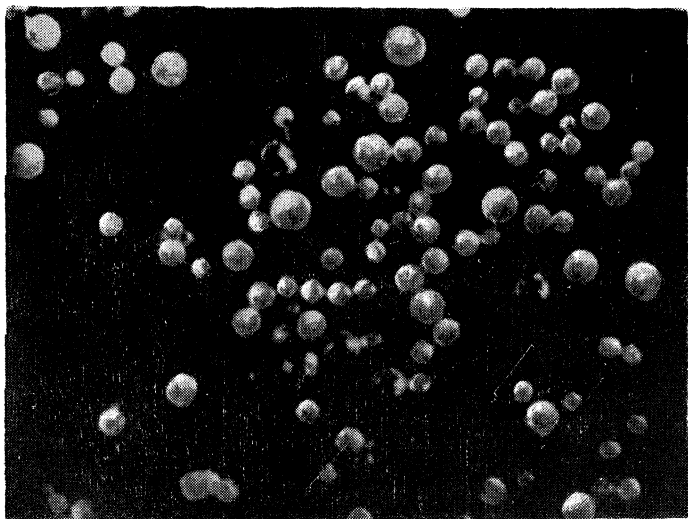


Рис. 17. Продукты сгорания частиц алюминия диаметром 70 мк.

и углерода [2—16, 47—53, 70—73]. Значительно меньше изучено горение металлических порошков.

Рассмотрим горение металлической частицы по результатам экспериментальных исследований [2, 10, 72]. Процесс горения металлической частицы начинается после ее воспламенения. Температура горения всегда выше температуры воспламенения. Экспериментально установлено, что горение может проходить в двух формах: горение на поверхности частицы (поверхностное горение) и горение в паровой фазе, т. е. горение (окисление) в парах металла (парофазное горение).

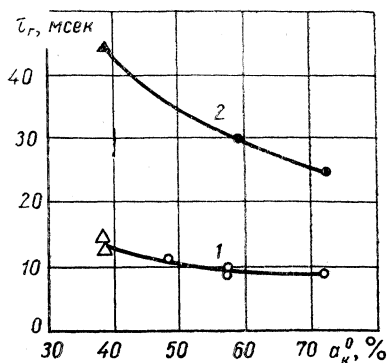


Рис. 11. Зависимость времени горения сферических алюминиевых частиц диаметром 70 (1) и 140  $\mu\text{м}$  (2) от относительной концентрации кислорода при температуре выше  $2000^\circ\text{К}$ .

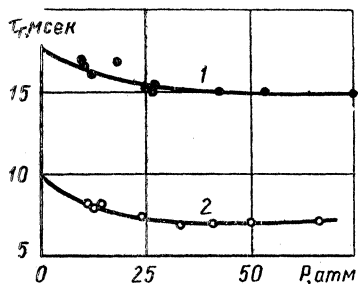


Рис. 12. Зависимость времени горения сферической алюминиевой частицы диаметром 70  $\mu\text{м}$  при концентрации кислорода 37,5 (1) и 71,5% (2) от начального давления в газовой среде.

Скорость горения металлической частицы в газовой среде зависит от многих факторов, и прежде всего от концентрации кислорода (его химической связи в молекулах) и температуры газовой среды.

В работе [2] приведены данные исследований горения алюминиевой частицы в газовой среде. Частицу в процессе ее горения фотографировали с помощью скоростной кинокамеры СКС-1М и фоторегистратора ФР-11. Результаты этих экспериментов представлены в виде графиков.

Из рис. 11 следует, что с увеличением концентрации кислорода время горения уменьшается. Следовательно, с повышением концентрации кислорода улучшается подвод кислорода к частице и таким образом увеличивается скорость горения. Время горения частицы практически не зависит от давления в исследуемом диапазоне (рис. 12). Авторами [2] получена эмпириче-

ская формула для определения времени горения алюминиевых частиц:

$$\tau_r^0 = 0,67 \frac{d^{1,5}}{(a_k^0)^{0,9}}, \quad \text{мсек}, \quad (1.7)$$

где  $d$  — диаметр сферической частицы,  $\mu\text{к}$ ;  $a_k^0$  — концентрация кислорода, %.

При  $d = 50 \mu\text{к}$  и  $a_k^0 = 57,5\%$  время горения составляет  $0,64 \text{ мсек}$ . Кроме того, установлено, что время горения алюминиевой частицы при  $P > 20 \text{ атм}$  и  $T > 2000^\circ \text{ К}$  практически не зависит от давления в газовой среде и температуры газа, но в значительной степени зависит от концентрации активных кислородсодержащих продуктов ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и т. д.).

Анализ существующих моделей горения показывает, что в случае поверхностного горения частицы алюминия время горения должно быть пропорциональным диаметру частицы; при парофазном горении время горения пропорционально  $d^2$  [72]. Однако результаты экспериментов показывают, что время горения пропорционально  $d^{1,5}$ . Полученные данные наводят на мысль об одновременном существовании обеих фаз горения.

В работе [10] при исследовании горения бериллия установлено, что при малой концентрации кислорода, низких начальных давлениях и высоких температурах происходит поверхностное горение. При большой концентрации кислорода, высоких начальных давлениях и низких температурах горение наблюдается в газовой фазе.

## МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ

Под механизмом горения будем понимать полный комплекс всех процессов, происшедших с частицей, начиная от первоначального ее состояния до покоящихся продуктов после горения. Знание механизма горения позволяет правильно выбрать физическую модель, отвечающую действительности и дает ключ к созданию теоретических основ гетерогенного горения.

Известный интерес представляют работы [2, 8], посвященные исследованию механизма горения частиц в горячей среде.

Однако, по мнению некоторых авторов, горение в горячей среде происходит при достижении температуры плавления окисной пленки, и при этом допускается, что механизм горения частиц в холодной среде аналогичен. Такое предположение не подтвердилось в наших экспериментах. В главе III показано, что температура воспламенения частиц в холодной среде значительно ниже температуры плавления окисной пленки и в отдельных случаях может быть ниже температуры плавления материала частицы.

Рассмотрим кинетику горения отдельных частиц согласно работе [8] (рис. 13—17, см. вклейку).

На рис. 13 показана горящая частица, когда она еще находилась в пламени горения, но значительно позже начала ее воспламенения. Следы частицы говорят об установившемся самоподдерживающемся горении. Виден образовавшийся пузырек окиси сферической формы. На рис. 14 видна часть большой полый сферы, в центре которой находится частица. По-видимому,

Рис. 18. Механизм окисления (горения) магниевой частицы малого диаметра:

*I* — частица Mg малого диаметра; *II* — частица Mg при высокой интенсивности теплообмена нагревается и приобретает сферическую форму; *III* — сферическая частица с небольшим скоплением окиси на ее поверхности; *IV* — вокруг частицы образуется облако испарившегося металла; *V* — испарившийся металл с притоком кислорода образует диффузионное пламя.

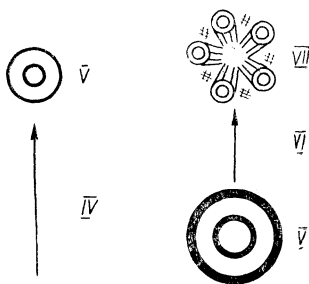
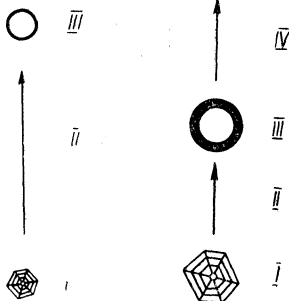


Рис. 19. Механизм окисления (горения) магниевой частицы большого диаметра:

*I* — частица Mg большого диаметра; *II* — частица Mg при менее высокой интенсивности теплообмена нагревается и приобретает сферическую форму; *III* — сферическая частица с окисью на ее поверхности; *IV* — испарение металла и увеличение слоя окиси; *V* — диффузионное пламя над слоем окиси; теплопередача от пламени к металлу; *VI* — металл кипит, слой окиси разрушается; *VII* — разрушенная частица образовала несколько сферических частиц, горящих диффузионным пламенем.



полая сфера образовалась из этой центральной частицы. Сферическое пламя самоподдерживающейся реакции горения частицы алюминия диаметром 150 мк показано на рис. 15. Остывшие продукты горения — окиси или неположительно сгоревшие частицы — имеют в большинстве случаев сферическую форму (рис. 16 и 17).

При спектроскопическом исследовании горения металла [3] процесс горения удалось исследовать более подробно. Так, Mg имеет температуру плавления 923° К, температуру кипения 1381° К, в то же время его окись имеет температуру плавления 3075° К, а температуру кипения 3350° К. Окисная пленка MgO пористая и не всегда способна изолировать поверхность металла от окисления. При парофазном горении металл в оболочке пленки, очевидно, кипит.



Механизм горения магния как летучего металла в этом случае можно представить в виде схемы (рис. 18 и 19). Механизм окисления и горения нелетучих металлов — алюминия, бериллия, титана — также можно представить схематически. На рис. 20 изображена схема окисления частицы Al большого диаметра до ее воспламенения, а на рис. 21 — возможные пути механизма горения частицы Al малого диаметра: *I* — частица Al малого диаметра; *II* — высокая интенсивность теплообмена; частица принимает сферическую форму; *III* — поверхностное окисление частицы; горения еще нет; *IV* — поверхностное окисление, переходящее в горение; *V* — поверхностное горение частицы, обусловленное диффузией в слое окисла; *VI* — теплообмен с окружающей средой, определяющий

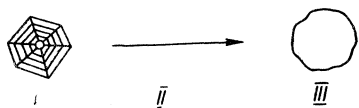


Рис. 20. Механизм окисления (горения) алюминиевой частицы большого диаметра:

*I* — частица Al большого диаметра; *II* — невысокая интенсивность теплообмена; происходит поверхностное окисление; *III* — частица разогревается и принимает сферическую форму, горения еще нет.

температуру поверхности частицы ( $T_{пов}$ ); соотношения  $T_{пов}$  с температурой плавления окисной пленки ( $T_{пл}^{\circ K}$ ); *VII* — поверхностное горение прекращается из-за слабой диффузии паров металла через утолщенную пленку окисла; *VIII* — медленное

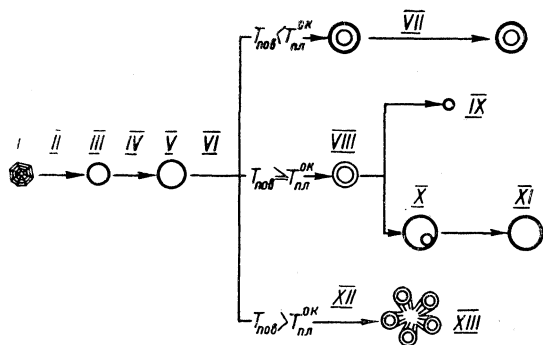


Рис. 21. Механизм окисления (горения) алюминиевой частицы малого диаметра. Объяснение в тексте.

поверхностное горение, часть жидкого окисла испаряется; *IX* — малая сферическая частица окисла; *X* — остаточные газы раздувают жидкую пленку окисла, но кислород еще диффундирует; *XI* — полая сферическая частица из окисла; *XII* — металл кипит и разрывает окисную оболочку; *XIII* — образованные мелкие сферические частицы горят диффузионным пламенем до полного образования окисла.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОРЕНИЯ И УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ

Под распространением горения условимся понимать распространение пламени по нормали к ее фронту. Скорость горения определяется соответственно изменением расстояния в единицу времени. Однако в литературе можно встретить иное определение скорости горения, а именно: под скоростью горения понимают количество сгоревшего топлива в единицу времени. В этом случае горение может происходить в замкнутом сосуде одновременно по всему объему (например, при самовоспламенении) и, естественно, линейная скорость будет равна нулю.

В работе [64] приведены экспериментальные данные скорости распространения пламени в воздушной среде с распыленным в ней алюминиевым порошком. Приводимые данные свидетельствуют о слабой зависимости скорости распространения пламени от размеров частиц и их концентрации в газодисперсной системе:

Диаметр частиц, $\mu\text{к}$	Концентрация распыленного алюминиевого порошка, $\text{мг/л}$	Скорость распространения пламени, $\text{см/сек}$
6—40	120	19,2
6—40	160	22,0
6—40	190	23,8
0—40	210	25,0

В наших опытах с алюминиевыми порошками (такой же дисперсности), распыленными в воздушной среде, скорость распространения пламени, определенная по скорости нарастания давления, оказалась равной 0,8—0,9  $\text{м/сек}$ . Такое расхождение можно, очевидно, объяснить только условиями проведения опытов.

Рассмотрим детонацию в среде. Под детонацией понимается наибольшая постоянная скорость распространения химических превращений, превышающая скорость звука в невозмущенной среде.

Переход горения в детонацию в газовых смесях изучен достаточно полно [35, 37, 38, 54—58, 67, 69, 77]. Для конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) этот переход изучен менее подробно. Результаты основных исследований приведены в работах [74—78]. Недостаточно изучен переход горения в детонацию для жидких топлив, например, в камерах сгорания двигателей [47, 80].

Вопрос о возможном переходе горения в детонацию для распыленных металлических порошков в кислородной газовой среде не исследован вовсе. Упомянуты лишь случаи взрыва (в форме детонации) металлических порошков в воде [81, 82].

Учитывая изложенное, рассмотрим условия возможного перехода горения в детонацию для распыленных металлических порошков в воздушной среде.

При горении газовых смесей скорость горения не превышает нескольких метров в секунду. Скорость горения твердых и жидких ВВ составляет всего несколько миллиметров в секунду. При детонации в газовых смесях скорость детонации — 1000—3500 м/сек, а давление — 10—50 ата.

При детонации в твердых и жидких ВВ скорость достигает 8000—9000 м/сек, а давление порядка — 100 000 ата.

Так, горение характеризуется медленным протеканием процесса диффузии окислителя в вещество и встречной диффузией паров металла к окислителю, а детонация характерна наличием мощной ударной волны. Ударная волна при своем распространении сжимает и тем самым нагревает вещество, вызывая быстрое химическое превращение. Выделяемая при этом энергия химических реакций непрерывно поддерживает ударную волну. Между детонацией и горением существует промежуточная стадия, переходные режимы.

Таким образом, можно предположить, что для возникновения детонации в кислородной газовой среде с распыленным в ней металлическим порошком необходима ударная волна, которая бы сжимала среду, нагревала ее и разрушала бы окисную пленку (механически или быстро расплавляла), что способствует лучшему доступу окислителя (кислорода) к чистому металлу. При прогрессивном окислении выделяющаяся энергия должна быть достаточной для подпитки, т. е. поддержания существования детонационной волны. Естественно, металлический порошок должен быть тонкодисперсным, химически активным, а газовая среда должна содержать достаточное количество кислорода.

Очевидно, ударную волну в газодисперсной системе можно создать путем взрыва заряда ВВ. Однако возможное возникновение и существование детонационной волны в таких газодисперсных системах необходимо проверить экспериментально.

В работе [81] показано, что при определенных условиях многие металлические порошки, смоченные водой (в насыпном состоянии), обладают взрывчатыми свойствами. Химическая реакция взаимодействия магния и алюминия с водой протекает с очень большим выделением тепла и значительного количества газов. Например, для магния, при определенных условиях, характерна химическая реакция взрывного действия



В этой реакции один грамм смеси реагирующих веществ выделяет 530 см<sup>3</sup> газа.

Сравнивая полученные характеристики взрываемости порошка магния с данными для тротила, видим, что магниевая смесь выделяет в 1,82 раза больше энергии, чем тротил, но количество образующихся газов в два раза меньше.

В настоящее время еще недостаточно уделяется внимания изучению вопросов перехода горения в детонацию в газо- и гидродисперсных системах. Незнание этого вопроса вызывает необходимость постановки специальных исследований в этой области.

## НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И МЕТОДИКИ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим лишь те свойства металлических порошков, от которых существенно зависит их физико-химическая активность. Это — дисперсный состав, удельная поверхность, форма частиц, состояние их поверхности (степень окисленности, загрязненность другими веществами). При взвешивании частиц металлических порошков в воздухе, как известно, могут возникать взрывоопасные системы.

В связи с этим будут кратко рассмотрены также вопросы аэродинамики частиц, распыления и флуидизации порошков, отрыва и переноса частиц течениями газа.

При производстве порошков, их последующей переработке и применении газодисперсные системы образуются в процессе измельчения материала, перегрузок, транспортирования, распада на фракции и выполнения других технологических операций. Кроме того, газодисперсные системы продуцируются при аспирации технологического оборудования в аспирационных системах: аспирируемых укрытиях, воздуховодах, пылеуловителях.

Следует также иметь в виду, что даже при эффективно действующей аспирации некоторое количество пыли попадает в атмосферу помещений, оседая на поверхности строительных конструкций и технологического оборудования. Если допускают накопление пыли, создается так называемый вторичный источник ее. Это приводит к часто наблюдаемой на практике двухстадийности взрывов: за счет воздушной волны локального взрыва взвихриваются отложения пыли, и взрыв распространяется в пределах возникающего аэрозольного облака. То же самое происходит с отложениями пыли в вентиляционных системах или полостях технологического оборудования, имеющих аэродинамическую связь с очагом воспламенения.

При исследовании пыли возникают трудности, обусловленные физическими и химическими свойствами газодисперсных систем. Задача осложняется еще и тем, что пыль содержит частицы различной крупности: наряду с очень мелкими частицами диаметром 1 мк и меньше содержатся 100-микронные частицы. Вследствие непрерывно протекающих процессов коагуляции, осаждения под действием различных эффектов, турбулентной диффузии концентрация частиц и дисперсный состав непрерывно изменяются. Не остается постоянным и процесс

пылевыведения, а концентрация частиц в пылевом облаке или в газодисперсном потоке может распределяться весьма неравномерно. Следовательно, измеряемая величина — концентрация частиц — не является постоянной, а изменяется во времени, и требуется иная оценка результатов измерений по сравнению с тем, когда измеряемая величина неизменна.

### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОШКОВ

Товарные порошки состоят из основного металла или механической смеси нескольких компонентов и содержат примеси или загрязнения. Химический состав порошков регламентируется соответствующими стандартами или ТУ.

Обычно основного металла в металлических порошках содержится не меньше 98—99%. Применяются и более чистые порошки. Так, в электролитических порошках титана содержание титана составляет 99,5% и выше.

В настоящей работе значительное внимание уделено характеристикам взрываемости железных порошков (гл. III), поэтому приводится их химический (табл. 4) и гранулометрический составы (табл. 5).

Таблица 4

Группа порошков	Железо общее, % (не менее)	Примеси, % (не более)						Остаток, не растворимый в соляной кислоте
		C	Si	Mn	S	P	O <sub>2</sub>	
ПЖ1	98,5	0,08	0,20	0,5	0,02	0,02	0,5	0,4
ПЖ2	98,0	0,12	0,25	0,6	0,03	0,03	1,0	—
ПЖ3	98,0	0,15	0,25	0,7	0,05	0,05	—	—
ПЖ4	96,0	0,25	0,45	0,7	0,05	0,05	—	—
ПЖ5	94,0	0,40	0,20	0,7	0,06	0,05	—	—

Таблица 5

Группа порошков	Доля подрешетного продукта (в %) при размере отверстий сит, мм				
	0,45	0,25	0,16	0,071	0,056
ПЖК	>90	>60	10	—	—
ПЖС	100	>90	20	—	—
ПЖМ	—	100	>90	—	—
ПЖОМ	—	—	100	>95	>70

Стандарты на железные порошки — ГОСТ 9849-61, группа В-56 [83] — включают пять групп железного порошка, отличающихся минимальным содержанием общего железа (от 94 до 98,5%). По гранулометрическому составу порошки разбиты

на четыре группы — крупный (К), средний (С), мелкий (М), очень мелкий (ОМ).

Содержание примесей и загрязнений в порошках определяется в основном качеством исходного сырья. Наряду с этим источником примесей может явиться загрязнение исходного материала при переработке, окисление в процессе выполнения технологических операций и последующего хранения.

Обычно наличие окислов ухудшает технологические характеристики порошка. Однако иногда, как показывает И. М. Федорченко [84], присутствие окислов в порошке улучшает их спекаемость. Это относится к окислам (которые легко восстанавливаются водородом) железа, меди, никеля, кобальта и др.

Следует отметить, что появление окисной пленки на частицах снижает их физико-химическую активность, а следовательно, и взрывоопасность. Производство порошков некоторых очень активных металлов вообще невозможно, если поверхность частиц не защищена пленкой окислившегося металла. Прочная пленка образуется на поверхности алюминиевых порошков. Поэтому при измельчении алюминиевой крупки защитная среда должна обязательно содержать кислород, необходимый для образования такой пленки.

К моменту определения характеристик пирофорности и взрываемости содержание окислов может увеличиться по сравнению с первоначальным при отборе пробы порошка. Поэтому необходимо располагать данными о фактическом химическом составе к моменту проведения испытаний. Известно, например, что даже при кратковременном хранении железного порошка содержание чистого железа может снизиться на 1,5—2%.

Примеси могут существенно влиять на пирофорные свойства порошков. Известно, что порошки из вторичного алюминия значительно активнее, чем из первичного. Поэтому при определении характеристик пирофорности и взрываемости очень важно располагать исчерпывающими данными о химическом составе порошка.

Порошки содержат также газообразные загрязнения — газы, адсорбированные на поверхности частиц и попавшие внутрь частиц в процессе их получения. В литературе очень мало данных о содержании в порошках газообразных примесей. Данные Сломена [85], исследовавшего отдельные порошки, не могут быть распространены на порошки, отличающиеся разнообразием технологических приемов их получения. Вместе с тем, если отрицательное влияние примесей газа на технологические качества порошков известно, то совершенно отсутствует информация о влиянии этих примесей на пирофорные характеристики.

Аэродисперсную (газодисперсную) систему, состоящую из дисперсной фазы — мельчайших частиц твердого вещества, которые способны находиться более или менее длительное время во взвешенном состоянии в воздухе, принято называть пылью. Это время зависит прежде всего от размеров и плотности частиц, а в случае пневмотранспорта еще и от скорости движения среды.

В спокойном воздухе время нахождения частиц во взвешенном состоянии определяется взаимодействием двух сил:  $G$  — силы тяжести и  $F$  — силы сопротивления воздуха.

Для частиц шарообразной формы сила тяжести

$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_1) g, \quad \text{дин}, \quad (\text{II.1})$$

где  $r$  — радиус частицы,  $\text{см}$ ;  $\rho$  — плотность частицы,  $\text{г/см}^3$ ;  $\rho_1$  — плотность воздуха,  $\text{г/см}^3$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\text{см/сек}^2$ .

Интерес представляют в основном частицы диаметром меньше  $100 \text{ мк}$ , поскольку более крупные, как правило, не взрывоопасны [86, 87 и др.].

Силу сопротивления воздуха для частиц диаметром  $1,5$ — $70 \text{ мк}$  с точностью до  $10\%$  можно определить по формуле Стокса

$$F = 6\pi\eta r v_B, \quad (\text{II.2})$$

где  $\eta$  — вязкость неподвижного воздуха,  $\text{г/см} \cdot \text{сек}$ ;  $v_B$  — скорость падения пылинки,  $\text{см/сек}$ .

Повышение скорости падения частиц влечет за собой пропорциональное увеличение силы сопротивления  $F$ . Если сила тяжести частицы  $G$  будет больше сопротивления  $F$ , то в таких условиях частица падает с ускорением, а в случаях, когда  $G=F$ , падение частиц происходит с постоянной скоростью. Эту скорость принято называть скоростью витания. Решив формулы (II.1) и (II.2) относительно  $v_B$ , получим

$$v_B = \frac{2}{9} r^2 \frac{\rho - \rho_1}{\eta} g, \quad \text{см/сек}. \quad (\text{II.3})$$

Значение  $\rho_1$  представляет весьма малую величину по сравнению с  $\rho$  и ею можно пренебречь. В этом случае, подставив в формулу (II.3) значения  $g$  и  $\eta$  (при давлении воздуха  $760 \text{ мм рт.ст.}$  и температуре  $20^\circ \text{C}$   $\eta = 1,816 \cdot 10^{-4} \text{ г/см} \cdot \text{сек}$ )



и выполнив соответствующие преобразования, получим упрощенную формулу установившейся скорости падения частиц шарообразной формы в спокойном воздухе

$$v_b = 0,012 \rho r^2, \text{ см/сек}, \quad (\text{II.4})$$

где  $r$  выражено в  $\mu\text{к}$ , а  $\rho$  — в  $\text{г/см}^3$ .

Скорости падения шарообразных частиц с  $\rho = 2,6$  в спокойном воздухе, вычисленные по формуле (II.4), приведены в табл. 6.

Таблица 6

Диаметр частиц, $\mu\text{к}$	Скорость падения	
	см/сек	м/ч
70	38,5	13,90
10	0,786	28,3
1,5	0,017	0,61

Данные таблицы показывают, что скорость падения частиц по мере уменьшения их размеров снижается очень быстро.

Поведение в воздухе высокодисперсных частиц диаметром менее  $0,1 \mu\text{к}$  приближается к поведению газовых молекул. Эти частицы, имея весьма малую массу, бомбардируются

газовыми молекулами и практически не оседают, непрерывно носятся в воздухе, участвуя в броуновском движении. Сопротивление воздуха обусловлено в данном случае тем, что спереди о поверхность движущейся частицы ударяется большее число молекул и с большей скоростью, чем сзади.

В автомоделной области  $10^3 < \text{Re} < 2 \cdot 10^5$ , где

$$\text{Re} = \frac{2r\rho_1 v_b}{\eta}, \quad (\text{II.5})$$

относящееся к движению частицы число Рейнольдса, сопротивление среды движению частиц подчиняется закону Ньютона. Этот закон в критериальной форме выражается следующей зависимостью:

$$\psi \text{Re}^2 = \frac{4}{3} \text{Ar}, \quad (\text{II.6})$$

где  $\psi$  — аэродинамический коэффициент сопротивления, для шара  $\psi \approx 0,44$ ;

$$\text{Ar} = \frac{8gr^3(\rho - \rho_1)\rho_1}{\eta^2} \text{ — критерий Архимеда.} \quad (\text{II.7})$$

Согласно уравнению (II.6), скорость витания

$$v_b = \sqrt{\frac{8g(\rho - \rho_1)r}{3\rho_1\psi}}. \quad (\text{II.8})$$

Если закон сопротивления Стокса (II.2) представить в критериальной форме

$$Re = \frac{1}{18} Ar, \quad (II.9)$$

то, очевидно, для вязкого режима обтекания шара в формуле (II.6)

$$\psi = 24 Re^{-1}. \quad (II.10)$$

Для переходной области было предложено большое количество эмпирических формул, связывающих  $\psi$  и  $Re$ . Достоверные данные в интервале  $3 < Re < 400$  дает формула, предложенная Л. С. Клячко [89],

$$\psi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}. \quad (II.11)$$

О. М. Годес и Р. Б. Розенбаум [90] предложили формулу, охватывающую весь диапазон режимов обтекания шара,

$$Re = Ar(18 + 0,61 Ar^{0,5})^{-1}. \quad (II.12)$$

При высокой концентрации твердой фазы сказывается стесненность движения, которая приводит к снижению скорости витания. Влияние стесненности на скорость витания учитывают введением поправочного коэффициента

$$v_{в.ст} = \epsilon v_{в.}, \quad (II.13)$$

и соответственно на коэффициент аэродинамического сопротивления (для области автомодельности)

$$\psi_{ст} = \epsilon^2 \psi. \quad (II.14)$$

Согласно данным П. В. Лященко [91],

$$\epsilon = (1 - \beta)^n, \quad (II.15)$$

где  $\beta$  — объемная концентрация твердой фазы;  $n$  — экспериментальный коэффициент, изменяющийся от 2,5 до 3,8, в среднем принимаемый равным 3. По данным Д. М. Минца,  $n = 2,25 - 4,5$  [92].

О. М. Годес с соавторами [93] обработкой опытных данных для стесненного движения установили обобщенную для всех режимов обтекания зависимость

$$Re_{ст} = \frac{Ar(1 - \beta)^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{Ar(1 - \beta)^{4,75}}}. \quad (II.16)$$

Ю. П. Гупало [94], предполагая распределение частиц в потоке равномерным и основываясь на формуле (II.12), аналитическим путем получил зависимость для всего диапазона режимов обтекания частиц

$$Re = Ar(1-\beta)^{4,8} \left\{ 18 + 0,61 Ar^{0,5} (1-\beta)^{0,33} \left[ 1 + (\rho - \rho_1) \frac{\beta}{\rho_1} \right]^{0,5} \right\}^{-1} \quad (II.17)$$

На рис. 22 представлено проведенное З. Р. Горбисом [95] сопоставление расчетных зависимостей для  $\epsilon$ . Как видим, стесненность движения массы частиц сильнее сказывается в ла-

минарной области и меньше — в турбулентной. При концентрации  $\beta \leq 0,005 - 0,01$  расхождение между  $v_{в.ст}$  и  $v_{в}$  при всех режимах обтекания частиц не превышает 5%, что находится в пределах точности определения скорости витания. Это свидетельствует о том, что в данной области концентрации твердой фазы влиянием стесненности можно пренебречь.

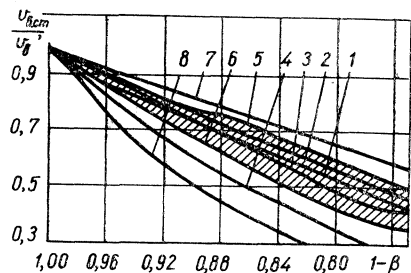


Рис. 22. Влияние концентрации на скорость витания:

1 — по формуле Лященко; 2, 3 — по формуле Тодеса при  $Ar=10^5$  и  $10^4$  соответственно; 4 — по формуле Гупало; 5-8 — по данным Минца (5, 6 — переходный режим; 7 — турбулентный режим; 8 — ламинарный режим).

могут влиять также стенки канала.

Для турбулентного режима Р. Б. Розенбаум [96] получила поправку

$$\epsilon_{ст} = [1 + 4,2 (1 - 2r/D) r/D] (1 - 2r/D)^2, \quad (II.18)$$

где  $D$  — гидравлический эквивалентный диаметр трубы с газодисперсной системой.

Расчеты показывают, что уже при  $D/2r=5$  поправочный коэффициент  $\epsilon_{ст} \approx 0,85$ . Это совпадает с результатами других авторов [97, 98].

Рассмотрим подробнее некоторые физические свойства газодисперсных систем с диаметром частиц в основном меньше 100 мк, обладающих большей физико-химической активностью и, следовательно, более взрывоопасных.

Формулы (II.2—II.4) получены для шарообразных частиц. Форма частиц металлических порошков очень разнообразна.

И. М. Федорченко и Р. А. Андриевский [84] условно, по происхождению порошков, делят их на семь групп, отмечая одновременно, что классификация не является строгой, и порошки даже одинакового происхождения в зависимости от особенностей технологии могут отличаться формой частиц. Поэтому понятие «диаметр» частицы — довольно условное, так как частицы имеют чаще всего неправильную форму, очень далекую от формы шара.

Под микроскопом удается определить только размеры проекции частицы. Высота может отличаться от размеров в плане, особенно при пластинчатой их форме. Поэтому необходимо принимать какую-нибудь усредненную величину, чаще всего пользуются «эквивалентным» диаметром или радиусом. Эквивалентным радиусом частицы  $r_э$  (соответственно диаметром  $d_э$ ) называется радиус (диаметр) шара объемом, равным объему данной частицы.

Под микроскопом обычно ограничиваются определением среднего размера проекции частиц, для чего измеряют частицы в двух взаимноперпендикулярных направлениях [88] максимального и минимального протяжений проекции, а среднеарифметическое принимают за величину среднего диаметра частицы. Иногда за средний его диаметр берут видимый под микроскопом поперечник частицы.

Измеренный таким путем средний диаметр, естественно, может отличаться от  $d_э$ . По данным П. Н. Торского [100], объем частиц с диаметром 1—60 мк, определенным таким путем, в 2,5—4 раза меньше объема шарообразных частиц равного диаметра.

При частицах нешарообразной формы сопротивление среды и скорости оседания подчиняется тем же закономерностям (II.2) — (II.3), но вводится коэффициент формы. Предложены различные коэффициенты для вычисления фактической скорости оседания частиц неправильной формы.

Н. А. Фукс [88] использует динамический коэффициент формы

$$x = \frac{r_э^2}{r_c^2}, \quad (\text{II.19})$$

где  $r_c$  — седиментационный радиус (радиус шара с той же плотностью и конечной скоростью оседания, что и у частицы).

Скорость оседания нешарообразной частицы выражается в этом случае формулой

$$v_b = \frac{2}{9} \cdot \frac{r_э^2 \rho}{\eta x} g. \quad (\text{II.20})$$

В других работах [101, 102] рекомендуют пользоваться коэффициентом  $\lambda$ , определяемым из выражения

$$\lambda = \frac{r_m}{r_c} = \frac{d_m}{d_c}, \quad (II.21)$$

где  $r_m$ ,  $d_m$  — микроскопический радиус, диаметр круга с площадью, равной площади проекции частицы, видимой под микроскопом. Тогда

$$v_b = \frac{2}{9} \cdot \frac{r_m^2 \rho}{\eta \lambda^2} g. \quad (II.22)$$

В литературе [88]  $d_m$  называют также «проекционным» или «проектированным» диаметром и обозначают его  $d_{пр}$ . В последнее время он получил распространение в связи с появлением фотоэлектрических аппаратов для автоматического подсчета частиц. Кроме того, известный метод микрометрии пылинок с помощью окулярных кружков также основан на подборе кружка с площадью, приближающейся к площади изображения частицы.

Сравнение величин  $d_{пр}$ , полученных планиметрированием проекций частиц стекольной пыли на микрофотографии, со значениями  $d$ , определенными по видимым под микроскопом поперечникам частиц, показало [103], что первый способ намного точнее.

Следует отметить, что проекционный диаметр совпадает с эквивалентным  $d_0$  только при шаровых частицах. Если ввести понятие об объемном коэффициенте формы  $d_v$ , связывающем проекционный диаметр частицы и ее объем, будет справедливо соотношение  $V = a_v d_{пр}^3$ . В случае шаровой частицы  $a_v = \pi/6$ . Определение объема отдельных частиц связано с большими трудностями, а опубликованных данных по этому вопросу очень мало. Катрайт [104] для кварцевых частиц с  $d_{пр} = 4,5$  мк получил величину  $d_v$  в пределах 0,23—0,25. Это означает, что для данных частиц  $d_0 = (0,76 \div 0,78) d_{пр}$ .

Величина динамического коэффициента формы  $\lambda$  зависит от крупности частиц. При малых скоростях движения, соответствующих вязкому режиму (сопротивление среды пропорционально скорости), частицы благодаря броуновскому движению могут ориентироваться любым образом по отношению к направлению своего движения либо сохранять первоначальную ориентацию. При достижении критического значения, относящегося к движению частиц числа Рейнольдса (Re) около 0,05—0,1 (что соответствует для частиц с плотностью  $\rho = 2,6$  г/см<sup>3</sup> и  $\eta = 1,816 \cdot 10^{-4}$  г·см<sup>-1</sup>·сек<sup>-1</sup> диаметру частиц 20—30 мк) характер движения частиц начинает изменяться: они стремятся занять положение, при котором сопротивление среды макси-

мальное, и достигают его при возрастании величины  $Re$  примерно до нескольких десятков.

Следовательно, для каждой крупной частицы неправильной формы  $\kappa$  всегда больше единицы. Для мелких частиц среднестатистическое значение  $\kappa$  также не меньше единицы.

Отклонения  $d_m$  от диаметра седиментационного  $d_c$  особенно велики для частиц пластинчатой формы.

Таким образом, неправильная форма частиц может быть описана геометрически или динамически. Катрайт [104] предложил метод, объединяющий математически оба способа. Автор различает два проекционных диаметра: диаметр осевших частиц, ориентированных своей максимальной площадью к поверхности осаждения  $d_m$ , и диаметр произвольно ориентированных частиц  $d_R$ . Катрайт утверждает, что возможна корреляция между динамикой и геометрией частиц неправильной формы, если представить их моделями-сфероидами определенного типа, и приводит таблицы и формулы для определения главной оси или отношения осей эллипсоида вращения по любым двум измеренным параметрам из четырех:  $d_c, d_a, d_m, d_R$ .

Необходимо отметить, что формула Стокса (II.2) и полученные на ее основе зависимости (II.3; II.4; II.22) имеют очень большое значение в механике аэродисперсных систем, и в частности при движении и осаждении взвешенных частиц в помещениях, во всевозможных пылеочистных аппаратах, вентиляционных потоках и в пылеизмерительных приборах. Хотя интервал дисперсности частиц, для которого справедлива формула (II.2), узок, посредством соответствующих поправок и отказа от большой точности ее удается распространить на довольно широкую область — от 0,1 до 70 и даже 100  $\mu\kappa$ , т. е. на область, особенно интересующую нас в связи с пирофорностью металлических порошков.

Все изложенное о витании частиц для стоксовской области относится к изолированным частицам. При высокой концентрации частиц они могут двигаться облаком. При этом среда полностью обтекает облако, которое движется как одно целое, в результате чего оно может оседать значительно скорее, чем изолированные частицы; недоучет этого явления приводит к ошибочным выводам. Облако образуется при взрывах. В виде облака могут оседать частицы в суспензиях при седиментационном анализе [105].

При оседании частиц в ограниченном стенками пространстве скорость оседания частиц, в отличие от движения облака, меньше скорости изолированных частиц в неограниченном объеме. Подобные условия могут иметь место в пылеизмерительных приборах, основанных на седиментационном эффекте. Известные из литературы формулы при очень малых объемных концентрациях дисперсной фазы  $\beta$  позволяют лишь приблизительно

оценить влияние условий оседания в ограниченном стенками пространстве на скорость оседания. Для отношения скорости оседания системы частиц  $v_{в.ст}$  и изолированной частицы  $v_{в}$  при  $\beta \rightarrow 0$  приводится формула  $\frac{v_{в.ст}}{v_{в}} = 1 - k\beta$  [88, 104], при этом  $k$

находится в интервале 4—5. Определим это отношение для реальных условий оседания частиц в седиментометре Фигуровского: плотность материала частиц  $\rho = 2,6 \text{ г/см}^3$ , плотность жидкости  $\rho_1 = 1 \text{ г/см}^3$ , объем суспензии  $400 \text{ см}^3$ , навеска порошка  $0,5 \text{ г}$ , тогда  $\beta = \frac{0,5}{2,6 \cdot 400} = 0,5 \cdot 10^{-3}$  и  $\frac{v_{в.ст}}{v_{в}} = 1 - 5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,997$ . Таким образом, для рассматриваемых условий, при очень малой объемной концентрации частиц,  $v_{в.ст}$  незначительно отличается от  $v_{в}$ .

В реальных условиях приходится иметь дело также с неравномерным движением частиц. Если пренебречь сопротивлением, связанным с затратой энергии на приведение в движение самой среды [88], то скорость, которую приобретет покоящаяся в момент  $\tau = 0$  частица, попадая в поток, движущийся со скоростью  $v_1$ , или оседая в неподвижном воздухе под действием силы тяжести ( $v_1 = v_{в}$ ), составит

$$v = v_1(1 - e^{-\tau/\tau_i}), \quad (\text{II.23})$$

где

$$\tau_i = \frac{2r^2\rho}{9\eta}. \quad (\text{II.24})$$

Пройденный частицей путь

$$s = v_1\tau - v_1\tau_i(1 - e^{-\tau/\tau_i}). \quad (\text{II.25})$$

При замедленном движении частицы, обладающей начальной скоростью  $v_0$ ,

$$v = v_0 e^{-\tau/\tau_i}, \quad (\text{II.26})$$

$$s = v_0\tau_i(1 - e^{-\tau/\tau_i}). \quad (\text{II.27})$$

Параметр  $\tau_i$ , который называют временем релаксации, определяет характер неравномерного движения и представляет собой одну из основных характеристических величин в механике аэрозолей [88].

Согласно приведенным формулам, частица с диаметром  $d = 10 \text{ мк}$  и плотностью  $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$ , покоящаяся в момент  $\tau = 0$ , попадая в поток, уже через  $0,01 \text{ сек}$  приобретает скорость, которая меньше скорости потока всего на  $2,3 \cdot 10^{-4}\%$ . При скорости потока  $500 \text{ см/сек}$  за это время частица пройдет путь  $4,62 \text{ см}$ . При замедленном движении в момент  $\tau = 0,01 \text{ сек}$  от начала замедления скорость частицы составит всего  $2,3 \cdot 10^{-6}$  первоначальной.

чальной, т. е. при  $v_0 = 500$  см/сек эта скорость будет составлять  $1,15 \cdot 10^{-3}$  см/сек.

Следовательно, при замедленном движении частица почти мгновенно теряет сообщенную ей скорость и, наоборот, столь же быстро приобретает ее, попадая в поток или оседая под действием силы тяжести в неподвижном воздухе; чем мельче частица, тем быстрее наступает этот момент. Благодаря первой особенности выбивание частиц из укрытий под влиянием первоначально сообщаемой им скорости (например, при срыве частиц с движущихся частей механизмов, разлете частиц в результате механического разрушения кусков и т. п.) практически исключено. Второе свойство позволяет не учитывать инерцию частиц при седиментационном анализе и даже при движении их в потоке с большим градиентом скоростей.

При криволинейном движении частиц, которое весьма распространено в вентиляционных системах и пылеизмерительных приборах, большую роль играет величина инерционного пробега частицы

$$l_i = v_0 \tau_i = \frac{2}{9} \cdot \frac{v_0 r^2 \rho}{\eta} \quad (II.28)$$

Квадратичная зависимость инерционного пробега частицы от ее диаметра означает, что с уменьшением размеров частиц  $l_i$  быстро уменьшается. То же происходит и с эффективностью осаждения пыли за счет инерционных сил: с уменьшением диаметра частиц быстро понижается эффективность.

На принципе осаждения пыли в поле центробежной силы работают различные циклоны. Этот же принцип используется в аэрозольных центрифугах для определения распределения размеров частиц.

При движении газодисперсной системы в трубах турбулентное течение является основным. Турбулентность потока способствует перемешиванию частиц. Под действием турбулентной диффузии, обусловленной вихревым движением воздуха, вероятность подъема и опускания частиц одинаковая, в то время как сила тяжести действует только в одном направлении. Наряду с гравитационным осаждением частицы из потока осаждаются также за счет турбулентной диффузии. Дауес и Слек [102] для отношения скорости осаждения на стенках и на подошве канала прямоугольного сечения получили величину

$$2,03 d^{-1,35},$$

где  $d$  — диаметр,  $мк$ ; крупность частиц находилась в пределах 2—32  $мк$ .

При наличии конвекции частицы будут увлекаться конвективными токами. Н. А. Фукс, использовавший опубликованные



расчетные зависимости [106], рассчитал, что в камере высотой 1 м, заполненной воздухом, температура которого отличается от температуры вертикальной стенки всего на  $0,01^\circ$ , скорость токов достигает примерно 1 см/сек, т. е. равна скорости оседания частиц диаметром около 20 мк. Это следует учитывать при использовании седиментометрических методов анализа концентрации и дисперсного состава пыли. Появление температурного градиента в сосуде с аэрозолем можно предотвратить, поместив его в термостат.

Витающие частицы обычно несут *электрические заряды*. Происхождение их объясняют возникновением зарядов в момент разделения контактов, трением пылевых частиц между собой, адсорбированием ионов из воздуха и также связывают его с химическим составом пыли [107]. Установлено, что в атмосфере производственных помещений пыль обычно содержит одновременно положительно и отрицательно заряженные частицы примерно в равных долях. Экспериментально Дауес и Слек [102] получили, что величина заряда на пылевых частицах не превышает трех электронов на  $1 \text{ мк}^2$  их поверхности.

*Осаждение частиц в электрическом поле*, широко применяемое в технике для очистки газов от пыли, используется также для определения концентрации пыли и распределения размеров частиц. Эффективен метод исследования движения частиц в вертикальном электрическом поле. Он позволяет определять величины элементарного электрического заряда, динамического коэффициента формы частиц, размера частиц, их подвижности и др.

*Действие радиометрических сил* проявляется в отталкивании частиц нагретыми телами: от более нагретой стороны частицы газовые молекулы отлетают с большей скоростью, чем от менее нагретой, и тем самым сообщают частице импульс в направлении убывания температуры (термофорез). Этим эффектом обусловлено, в частности, отложение пыли на стенках против отопительных батарей. Данный эффект применяется при исследовании аэрозолей (термопреципитация): пропуская аэрозоль через канал, по оси которого натянута нагреваемая электрическим током проволока, можно осадить частицы на стенках канала. Вокруг нагреваемого тела образуется так называемый черный слой, не содержащий частиц.

*Процесс коагуляции частиц* (слипание или слияние взвешенных частиц при соприкосновении) может быть вызван одним лишь броуновским движением, или же на это движение накладывается упорядоченное движение частиц друг к другу под действием гидродинамических, электрических, гравитационных и других сил. В соответствии с этим различают [88] тепловую коагуляцию (броуновскую), тепловую коагуляцию с заряженными частицами, коагуляцию в электрическом поле, коагуляцию под действием звуковых колебаний, кинематическую (гравитацион-

ную) коагуляцию, коагуляцию при перемешивании в турбулентном потоке.

Из основного уравнения коагуляции

$$\frac{dN}{d\tau} = -K_0 N^2, \quad (II.29)$$

которое в интегральной форме имеет вид

$$N = \frac{N_0}{1 + K_0 N_0 \tau}, \quad (II.30)$$

где  $N_0$  — начальная концентрация, *частиц/см<sup>3</sup>*;  $N$  — концентрация по истечении определенного времени ( $\tau$ , *сек*), *частиц/см<sup>3</sup>*;  $K_0$  — константа коагуляции, *см<sup>3</sup>·сек<sup>-1</sup>*, следует, что процесс коагуляции с уменьшением концентрации частиц очень быстро замедляется. Например, при тепловой коагуляции изодисперсных сферических пылинок диаметром 0,4 *мк*  $K_0 = 4,14 \cdot 10^{-10}$  *см<sup>3</sup>·сек<sup>-1</sup>*, в этом случае начальная концентрация, равная  $10^6$  *частиц/см<sup>3</sup>*, снизится через 30 *мин* в 1,75 раза, а при начальной концентрации  $10^4$  *частиц/см<sup>3</sup>* она снизится через 3 *ч* всего на 4%.

Процесс коагуляции протекает интенсивнее для полидисперсной пыли с увеличением неравномерности распределения размеров частиц. Константа коагуляции вытянутых частиц больше, чем шарообразных. Гигроскопичность вещества частиц и высокая влажность воздуха также способствуют интенсификации коагуляции.

В пылеизмерительных приборах при отборе проб, последующей их обработке, дисперсном анализе пыли частицы также могут коагулировать, что искажает результаты измерений. Необходимо принимать соответствующие режимы и использовать методы, предотвращающие это явление.

Остановимся на процессах *отрыва частиц* от поверхности слоя порошка и уноса их потоком газа. Эти процессы происходят, в частности, при взметывании отложений пыли в производственных помещениях, а также распылении порошков для продуцирования облака газозвеси в установках по определению характеристик взрываемости порошков.

Механизм отрыва частиц связан с очень сложными и мало изученными физическими явлениями: отсутствуют данные о величине молекулярных сил, препятствующих отрыву частиц от поверхности и друг от друга, и силах, действующих со стороны воздушного течения.

Экспериментальные работы [108] показали, что для частиц 50—100 *мк* и в области более крупных частиц с уменьшением размеров уменьшается и критическая скорость потока. В области

более мелких частиц критическая скорость с уменьшением их размеров начинает повышаться. Это можно объяснить тем, что для таких частиц все более существенную роль начинают играть силы адгезии. Получено, что для отрыва частиц крупностью 20 мк требуется скорость потока 10—12 м/сек.

В последнее время выполнено много экспериментальных работ по изучению флуидизации порошков, благодаря которым в какой-то мере расширилось представление о механизме распыления порошков.

При сравнительно небольших скоростях набегающего на слой порошка потока частицы с поверхности слоя отрываются и уносятся вверх. Одновременно с уносом частиц поток уплотняет слой, образуя хорошо обтекаемые профили, и унос прекращается. Возобновление процесса возможно при значительно большей скорости, затем все повторяется в той же последовательности. Однако при очень больших скоростях потока картина существенно изменяется: вырываются целые агрегаты частиц, поверхность делается все более неровной, что облегчает дальнейшее вырывание агрегатов [88].

Полную дезагрегацию порошков с частицами крупнее 40 мк при помощи воздушной струи осуществить нетрудно. С уменьшением размеров частиц заметную роль начинают играть силы сцепления между частицами, получить полное распыление становится все труднее.

Н. А. Фукс [109] объясняет плохую распыляемость тонких порошков, рассматривая силу, действующую на агрегат частиц в градиентном потоке и стремящуюся разорвать слипшиеся частицы

$$F_m \approx 12\pi\eta r^2 G, \quad (\text{II.31})$$

где  $G$  — градиент скорости течения. Сила же адгезии в первом приближении пропорциональна  $r$ .

По данным Дэвиса [227], полная дезагрегация тонких угольных частиц достигается при истечении струи через щель шириной 0,5 мм со скоростью 150 м/сек.

Безусловно, кроме размеров частиц на силу адгезии существенно влияют их физико-химические свойства, форма частиц, плотность упаковки. Поэтому труднее распылять полидисперсные порошки, плотность упаковки которых больше, чем изодисперсных. Значительно усиливает адгезию между частицами добавка даже небольшого количества влаги. Гидрофобные порошки распыляются лучше гидрофильных. Известно также, что порошки из мягких пластичных материалов распыляются хуже, чем из твердых.

Прочность агрегатов может существенно повышаться за счет электростатических или магнитных сил. По данным Д. Бейшера,

на которые ссылается Н. А. Фукс [109], в агрегатах из магнитной окиси железа разрывная сила в 100—1000 раз больше, чем в агрегатах из немагнитной окиси железа.

## ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ ПОРОШКОВ

Порошки характеризуются обычно высокой степенью полидисперсности: диаметры частиц — от 0,5 *мм* до долей микрона. Разделение грубых частиц на фракции не встречает особых затруднений и может быть выполнено ситовым анализом. Однако стандартные сита имеют минимальный размер отверстий — 44 *мк*. Поэтому приводимые в литературе данные ограничиваются обычно информацией о характеристике дисперсного состава фракций крупнее 44—56 *мк*. Вместе с тем физико-химическая активность особенно повышена у частиц меньших размеров.

Дисперсный состав принято выражать в процентном соотношении весовых или счетных показателей различных фракций частиц. При графическом изображении чаще используются дифференциальные и интегральные кривые распределения и гistogramмы.

На практике нередко вместо данных о распределении размеров частиц ограничиваются указанием «среднего» их размера. Располагая данными о концентрации в счетных и весовых показателях, находят среднюю массу частиц и, если известна их плотность, средний размер частиц. Необходимо отметить, что существуют различные средние величины диаметров: среднеарифметический, средний квадратичный — средний по поверхности (II.32), средний кубический — средний по объему или средний весовой (II.33), средний геометрический.

$$d_1 = \left[ \sum_{\nu} d_{\nu}^2 N_{\nu} / N \right]^{1/2}, \quad (\text{II.32})$$

$$d_2 = \left[ \sum_{\nu} d_{\nu}^3 N_{\nu} / N \right]^{1/3}, \quad (\text{II.33})$$

где  $d_1$  — средний квадратичный диаметр;  $d_2$  — средний кубический диаметр;  $N_{\nu}$  — число частиц в  $\nu$ -м интервале;  $d_{\nu}$  — середина этого интервала;  $N$  — общее количество частиц.

При выборе среднего для характеристики дисперсности системы частиц исходят из характеризующих свойств. Так, при счетном и весовом методе определяют средний кубический диаметр; для характеристики скорости оседания пыли под действием силы тяжести или инерционных сил следует брать средний квадратичный диаметр, то же — при оценке физико-химической активности порошка.

С. Е. Андреев [110] при выводе формул среднего диаметра частиц тонкоизмельченного материала применил понятие об определяющем свойстве. Задача при этом сводится к определению такого среднего диаметра, при котором в усредненном коллективе частиц сохраняется количественно неизменным интересующее нас свойство.

Следует отметить, что пользование средними показателями размеров частиц уместно, когда отдельные частицы по крупности

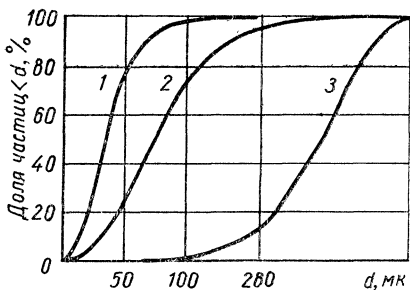


Рис. 23. Интегральные кривые весового распределения (%) по крупности железных порошков Сулинского завода:

1 — пыль из аспирационной системы; 2 — ПЖЗМ; 3 — ПЖЗС.

различаются незначительно. В случаях, когда порошки включают частицы с размерами, растянутыми на несколько порядков, понятие среднего радиуса вообще теряет физический смысл.

Если принять условно, что все частицы приблизительно имеют одинаковую форму и удельный вес, то переход от кривых счетного распределения к кривым весового распределения можно осуществить путем определения среднего диаметра частиц каждого интервала и затем доли каждой фракции по формуле

$$m(d_v) = \frac{d^3 N_v}{\sum_1^n d^3 N} \quad (II.34)$$

где знаменатель — сумма произведений куба диаметра на число частиц всех ( $n$ ) интервалов.

Таким образом, для перехода к весовому распределению нет необходимости определять вес каждой фракции, поскольку это, из-за отсутствия точных данных об объеме частиц, может приводить к ошибкам.

В случае разнородного состава порошка из данных микроскопических измерений можно получить лишь объемное распределение, которое может отличаться от весового.

При переходе от счетного распределения частиц к весовому следует учитывать одно весьма важное обстоятельство. В связи с тем что объем, как и вес частицы, пропорционален линейному размеру в кубе, особое внимание необходимо уделять подсчету крупных фракций и определению размера их частиц.

Дифференциальные и интегральные кривые дают наглядное представление о распределении по крупности частиц (рис. 23—26). Однако при высокой степени полидисперсности правильно изобразить это распределение на таких графиках невозможно.

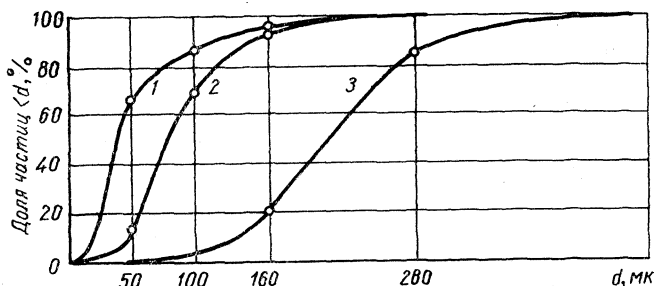


Рис. 24. Интегральные кривые весового распределения (%) по крупности железных порошков Броварского завода:  
1 — пыль из аспирационной системы; 2 — ПЖ2М; 3 — ПЖ2С.

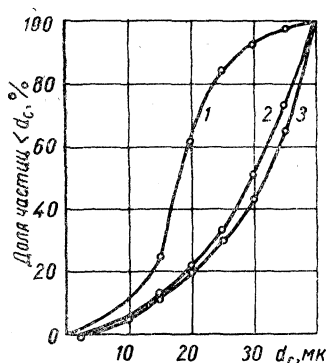


Рис. 25. Интегральные кривые весового распределения (%) по крупности фракций мельче 50 мк порошков Сулинского завода:

1 — пыль из аспирационной системы; 2 — ПЖ3М; 3 — ПЖ3С.

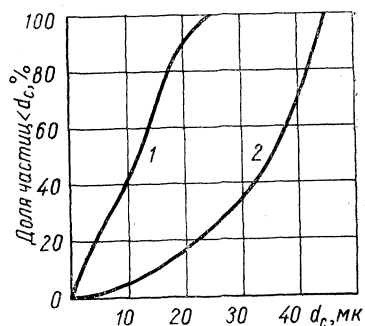


Рис. 26. Интегральные кривые весового распределения (%) по крупности фракций мельче 50 мк порошков Броварского завода:

1 — пыль из аспирационной системы; 2 — ПЖ2М.

Действительно, если диаметры частиц исследуемого порошка лежат в пределах 0,2—100 мк и вся длина графика вдоль оси абсцисс равна 100 мм, то на часть кривой распределения, соответствующую диаметрам 0,2—1 мк, приходится интервал лишь в 1 мм. При логарифмическом масштабе по оси абсцисс ущемленное положение очень мелких частиц устраняется, так как каждому порядку величины на графике отводится равное пространство. Однако в логарифмическом масштабе кривая теряет наглядность.

Большие достоинства имеет способ изображения распределения размеров, когда выбирают такую систему координат, в которой распределение выражается прямой линией. Этот вопрос неразрывно связан с установлением закономерностей распределения размеров частиц, на котором необходимо остановиться.

Из-за большой сложности и недостаточной изученности процессов измельчения и образования пыли, по существу, еще нет теоретического вывода формул распределения. Имеются попытки описать распределение с помощью эмпирических формул.

Широкое распространение, главным образом, при измельчении угля получила формула Розина — Раммлера. Эта формула, выведенная на основании результатов ситового анализа продуктов дробления и измельчения, удовлетворительно описывает весовое распределение размеров частиц грубоизмельченных материалов с диаметром частиц крупнее 60 мк. Формула Розина — Раммлера имеет вид:

$$R = 100 \exp(-bd^n) = 100 \exp\left(\frac{d}{d_e}\right)^n, \quad \%, \quad (\text{II.35})$$

где  $R$  — суммарный весовой выход частиц размером больше  $d$ ;  $b$  — постоянная, характеризующая степень измельчения;  $n$  — постоянная равномерности;  $d_e$  — размер частиц, при котором выход

$$R = \frac{100}{e} = 36,8, \quad \%,$$

После двойного логарифмирования формула (II.35) принимает вид:

$$\lg\left(\lg\frac{100}{R}\right) = n \lg d - n \lg d_e - \lg 2,303. \quad (\text{II.36})$$

Уравнение (II.36) в координатах  $\lg\left(\lg\frac{100}{R}\right)$ ,  $\lg d$  изображается прямой линией.

Известны попытки применения уравнения Розина — Раммлера к мелким фракциям. Однако многие авторы пришли к выводу о неприменимости его в этом случае. К такому выводу пришли, в частности, Гебеляйн [111], Батель [112], Самсонов [113], Кайе [114] и др.

Удовлетворительное совпадение весового распределения с формулой (II.36) в диапазоне размеров частиц от 1 до 40 мк получено [115] для пыли, содержащейся в аспирационном воздухе на заводах огнеупорных изделий.

Логарифмически нормальный закон распределения, в отличие от эмпирических распределений, теоретически обоснован. Исходя из допущения о независимости вероятностей раздробления каж-

дой частицы за единичный промежуток времени на определенное число частей тех или иных относительных размеров от размеров исходной частицы, А. Н. Колмогоров показал, что распределение размеров частиц по мере измельчения асимптотически стремится к логарифмически нормальному [116]. Логарифмически нормальное распределение выражается формулой

$$f(x) dx = \frac{1}{\ln \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2 \ln^2 \sigma} \right] d(\ln x), \quad (\text{II.37})$$

где  $x_0$  — среднее геометрическое диаметров частиц;  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение диаметров или стандартное отклонение;  $(\ln \sigma)^2 = (\ln x - \ln x_0)^2$  — среднее значение квадрата отклонения логарифма диаметров от логарифма среднего геометрического диаметров.

Доля частиц с диаметром  $\leq x$  равна

$$\int_{-\infty}^{\ln x} f(x) dx = F(x) = \frac{1}{\ln \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln x} \exp \left[ -\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2 (\ln \sigma)^2} \right] d(\ln x). \quad (\text{II.38})$$

Среднее геометрическое диаметров частиц, называемое также медианой распределения, определяется из формулы

$$\ln x_0 = \frac{\sum m \ln x}{\sum m} = \frac{m_1 \ln x_1 + m_2 \ln x_2 + \dots + m_n \ln x_n}{\sum m}, \quad (\text{II.39})$$

где  $m_1, m_2, m_3$  — доля фракций.

Логарифмы стандартного отклонения в логарифмически нормальном распределении характеризуют степень полидисперсности

$$\ln \sigma = \sqrt{\frac{\sum [m (\ln x - \ln x_0)^2]}{\sum m}}. \quad (\text{II.40})$$

В последнее время это распределение установлено несколькими исследователями для материалов, тонко измельченных в мельницах [117—119 и др.].

Чтобы распределение выразить прямой линией в прямоугольных координатах, по оси ординат необходимо проставить соответствующие значения функции

$$\Phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} \exp - \left[ \frac{\xi^2}{2} \right] d\xi, \quad (\text{II.41})$$

где  $\xi$  — нормированная величина распределения, равная

$$\xi = \frac{\ln x - \ln x_0}{\ln \sigma}, \quad (\text{II.42})$$



а по оси абсцисс откладывать  $\lg x$ . Способы построения такой сетки описаны в литературе, например в работе [120]; там же имеются таблицы с числовыми значениями функции  $\Phi(\xi)$ .

Применимость логарифмически нормального закона наглядно устанавливается в вероятностно-логарифмической сетке: если экспериментальные точки ложатся на общую прямую, то распре-

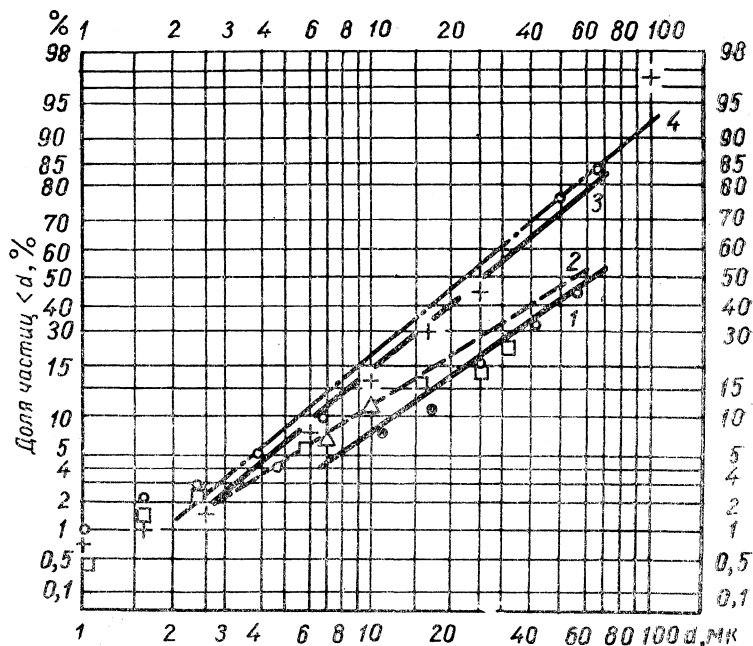


Рис. 27. Распределение размеров частиц в аспирационном воздухе:

1 — отсос от конусной дробилки мелкого дробления (ЮГОК); 2 — отсосы от дробилок III и IV стадий дробления (СевГОК); 3 — отсосы от укрытия перегрузки материала с конвейера на конвейер (МЖК, КМА); 4 — отсос от разгрузки конусной дробилки III стадии дробления (МЖК).

деление подчиняется этому закону. В таком случае по графику очень просто определить параметры распределения  $x_0$  и  $\sigma$ . Значение  $x_1$ , соответствующее доле частиц 50%, дает  $x_0$ , и при этом согласно уравнению (II.42),  $\xi=0$ . При  $\xi=1$   $\Phi(\xi)=84,13\%$  и  $\ln\sigma = \ln x - \ln x_0$ , а при  $\xi=-1$   $\Phi(\xi)=15,87\%$  и  $\ln\sigma = \ln x - \ln x_0$ . Тогда

$$\sigma = \frac{x_{84,13}}{x_0} \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{x_0}{x_{15,87}}$$

Логарифмически нормальное распределение одного из показателей частиц, например счетного, означает, что весовое и другие производные распределения также логарифмически нормальные и в вероятностно-логарифмической сетке изображаются прямыми, параллельными между собой. Линия счетного распре-

деления сдвинута относительно линии весового распределения влево на отрезок, равный  $3(\ln\sigma)^2$ , а линия распределения площадей поверхности частиц — на отрезок  $(\ln\sigma)^2$ .

Дисперсный состав пыли, содержащейся в воздухе, отсасываемом из укрытий дробильно-транспортного и сортировочного оборудования при переработке железосодержащих руд, представлен кривыми распределения, построенными в вероятностно-логарифмической сетке (рис. 27). Дисперсный состав определен с помощью пипеточного прибора с выпуском суспензии через дно цилиндра. Удовлетворительное совпадение с логарифмически нормальным распределением в данных условиях наблюдается в интервале размеров частиц 2—50 мк.

Точки на графике, лежащие за пределами области 2—50 мк, значительно отклоняются от прямой линии. Поэтому необходимо продолжать исследование с целью раскрытия закономерностей распределения в указанном диапазоне.

Попытка представить распределение железных порошков (см. рис. 23 и 24) в нормально-логарифмической сетке дала удовлетворительное совпадение точек с прямой лишь в диапазоне частиц 20—100 мк.

Отклонения фактического распределения от нормально логарифмического вызваны, очевидно, тем, что исходные условия при выводе формулы могут не сохраняться для всего диапазона размеров измельченных частиц, а также тем, что измельченный порошок проходит рассев и тем самым нарушается первоначальный дисперсный состав.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОШКОВ И ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

В связи с поставленными в данной работе задачами можно ограничиться рассмотрением методик исследования твердой фазы газодисперсной системы, необходимых для определения вещественного состава взвешенных в газе частиц, концентрации частиц, распределения их по крупности, а также для определения удельной поверхности. В работе не рассматриваются, естественно, методы определения вещественного состава дисперсной фазы, рассмотрен лишь отбор проб с массой, достаточной для соответствующих анализов.

Все известные методы определения концентрации и дисперсного состава взвешенных в газе частиц по своему принципу разделяются на две большие группы: с выделением дисперсной фазы из дисперсной среды; без выделения дисперсной фазы.

## Отбор проб твердой фазы из газодисперсных систем

Отбор проб проводят для определения концентрации частиц или состава вещества, удельной поверхности и, возможно, для других определений. В первом случае требуется относительно небольшая масса пробы, а в других величина ее должна быть значительно большей.

Величины взрывоопасной концентрации взвешенных в воздухе частиц наиболее активных металлов составляют несколько граммов в  $\text{л}^3$  воздуха, а малоактивных — сотни грамм в  $\text{л}^3$  воздуха.

Может существовать газодисперсная система с относительно установившейся концентрацией (например, при движении по трубам), или концентрация может очень быстро изменяться, не остается при этом постоянным и дисперсный состав (например, при образовании пылевого облака за счет ударной волны).

Отбор проб взвешенных в газе частиц из установившегося потока газозвеси проводится с помощью пылезаборных трубок. При отборе проб из трубопроводов, закрытых полостей оборудования и т. п. может применяться как внешняя, так и внутренняя фильтрация. При внешней фильтрации неизбежны потери массы пробы. Недостатком внутренней фильтрации являются неудобства при замене фильтра с пробой пыли.

Во избежание больших потерь пыли не следует отбирать пробы на мембранные, плоские бумажные или матерчатые фильтры. При использовании бумажных или матерчатых фильтров их необходимо выполнять в виде наперстка (гильзы).

Условие изокинетичности при отборе проб (обеспечение равенства скорости исследуемого потока в месте нахождения входного отверстия пылеприемника и скорости газа во входном отверстии последнего) можно выполнить двумя способами: использованием набора сменных наконечников, позволяющих соблюдать данное условие при постоянном количестве засасываемого газа, или изменением расхода забираемого газа при помощи трубок с уравновешенными статическими напорами — так называемых трубок нулевого типа.

При использовании обычных трубок со сменными наконечниками предварительно определяют скорость потока в точке забора проб взвешенных в газе частиц. Наконечник подбирают в соответствии с измеренной скоростью. При скорости потока в точке забора пробы больше принятой скорости воздуха в канале трубки диаметр входного отверстия наконечника будет меньше внутреннего диаметра трубки (рис. 28, а), и наоборот, при скорости потока меньше скорости воздуха в трубке диаметр входного отверстия наконечника будет больше (см. рис. 28, б).

Преимуществом таких трубок является простота устройства и сохранение постоянной скорости в канале трубки, при которой осаждение пыли на внутренней поверхности трубки минимальное. Второй фактор, естественно, теряет свое значение при использовании метода внутренней фильтрации. Однако, в связи с трудностями частых замеров скорости и замены наконечников при больших колебаниях скорости во времени и при необходимости снятия полей концентраций в потоках с неравномерным распределением скорости по поперечному сечению, пользоваться трубками со сменными наконечниками неудобно. В таких случаях предпочтительнее следует отдавать трубкам нулевого типа (рис. 29 и 30).

Существуют трубки нулевого типа как с внешней, так и с внутренней фильтрацией. На рис. 29 представлена конструкция нулевой трубки с внешней фильтрацией. Устройство нулевых трубок значительно сложнее устройства трубок со сменными наконечниками. Для соблюдения изокINETИЧНОСТИ статические напоры внутри канала трубки, равного по сечению его входному отверстию, и на внешней стенке трубки должны быть равны. Нулевая заборная трубка соединяется с микроманометром, и расход отбираемой пробы воздуха регулируется таким образом, чтобы показание микроманометра поддерживалось на нуле. Следует учитывать, что при нулевом показании микроманометра условие изокINETИЧНОСТИ может не соблюдаться из-за потерь напора воздуха на входе в заборную трубку. В связи с этим каждая трубка должна быть протарирована.

Методу внутренней фильтрации следует отдавать предпочтение в тех случаях, когда исследуемый порошок склонен к налипанию на стенки, что приводит к засорению канала заборной трубки. На рис. 31 изображена трубка с внутренней фильтрацией со сменными наконечниками. Трубка обогревается при отборе проб в потоках с высоким содержанием влаги или наличии водяных брызг. К трубке подводят ток напряжением 36 в. Газ нагревается до температуры выше точки росы, и на фильтре налипания порошка не происходит. Следует отметить, что при необходимости отбора большой массы порошка и наличии грубых фракций применяют двухступенчатую схему улавливания пыли из пробы газа. В качестве первой ступени обычно используют циклончик (рис. 32). Гинцветметом разработан автоматический реометр, позволяющий поддерживать постоянный расход отбираемого газа вне зависимости от изменения гидравлического

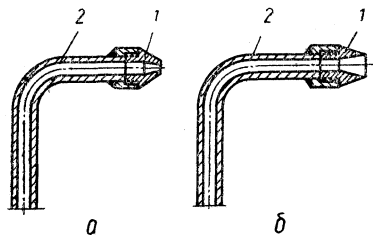


Рис. 28. Трубка со свинчивающимися наконечниками:  
1 — наконечник; 2 — трубка.

сопротивления фильтрующего устройства прибора. Это дает возможность одному лаборанту обслуживать несколько измерительных точек, а также осуществлять длительный отбор проб без постоянного наблюдения. Подробное описание автоматического реометра, а также конструкций пылезаборных трубок и методик по забору проб пыли из трубопроводов приводится в работе [121].

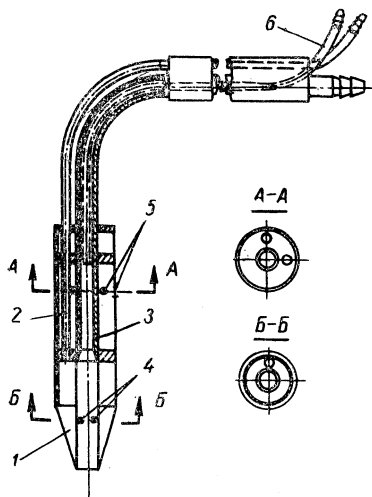


Рис. 29. Заборная трубка нулевого типа:

1 — носик; 2 — трубка статического напора на внутренней стенке канала заборной трубки; 3 — канал трубки; 4 — отверстия для измерения статического напора внутри трубки; 5 — отверстия для измерения статического напора на внешней поверхности трубки; 6 — трубка статического напора на внешней поверхности заборной трубки.

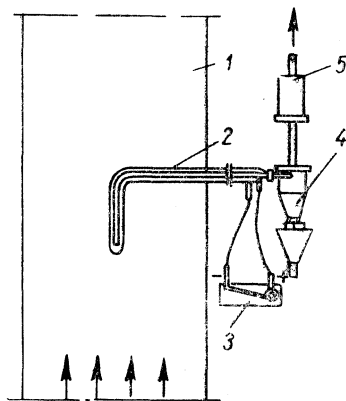


Рис. 30. Схема установки для отбора проб взвешенных в газе частиц с применением заборной трубки нулевого типа с внешней фильтрацией:

1 — трубопровод; 2 — нулевая трубка; 3 — микроманометр; 4 — циклончик; 5 — матерчатый фильтр.

Процесс отбора проб можно форсировать увеличением расхода забираемого воздуха (10—20 м<sup>3</sup>/ч и более). Побудитель тяги, пригодный для различных условий отбора проб воздуха, должен создавать разрежение в 1500—2000 мм вод. ст. К сожалению, воздуходувок с такой характеристикой не выпускают. Для этих целей можно использовать вакуумные насосы КВН-4 и КВН-8, отсасывающие соответственно 20 и 40 м<sup>3</sup>/ч воздуха и создающие разрежение до 400 мм рт. ст.

Для отбора проб взвешенных в газе частиц, при быстро изменяющейся концентрации, в ИПМ АН УССР разработан пробоотборник, основанный на принципе выделения из исследуемого газа определенного его объема, равного объему пробоотборника.

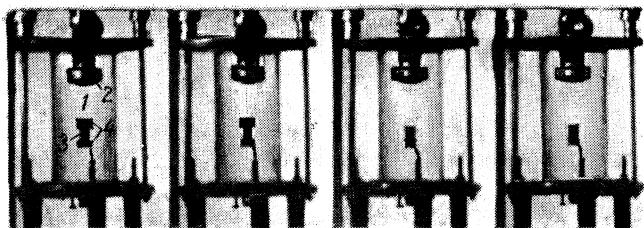


Рис. 34. Покадровая развертка киносъемки в момент отбора пробы пробоотборником:

1 — прозрачная модель взрывной камеры; 2 — распылитель; 3 — пробоотборник; 4 — створки.

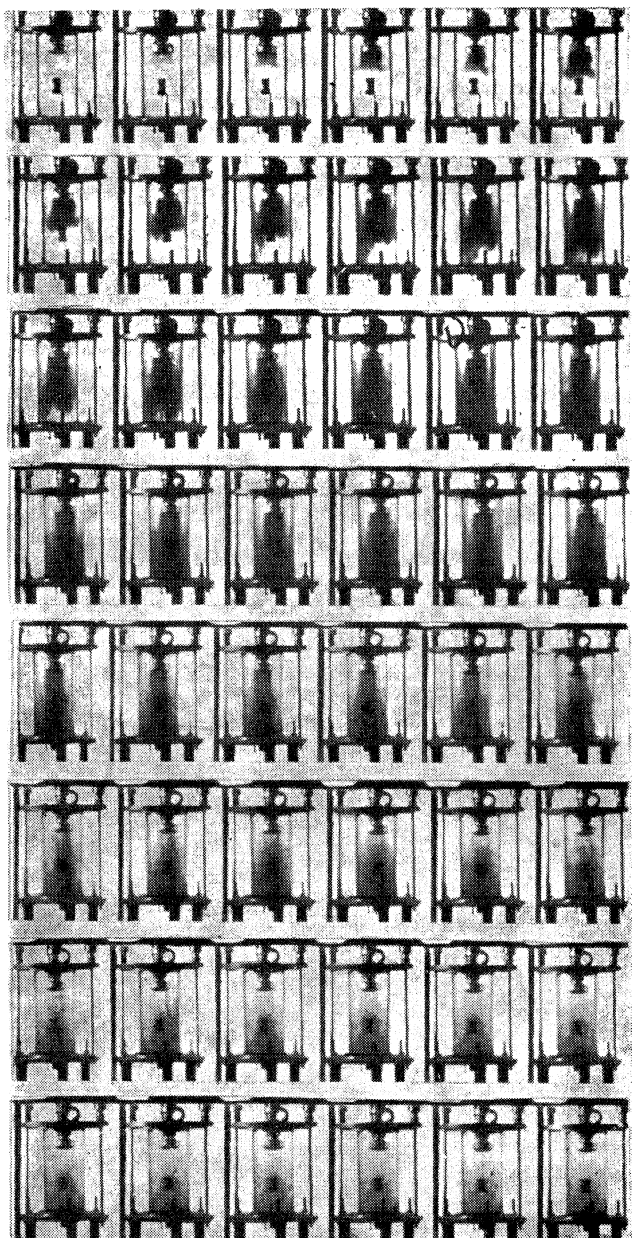


Рис. 60. Покадровая развертка процесса распыления порошка.

Прибор разработан с учетом особенностей условий протекания исследуемого процесса: нестационарности потоков газа, очень быстрого изменения концентрации частиц во времени и в широком диапазоне величин, скоротечности процесса, непрерывного изменения дисперсного состава твердой фазы.

В каждой из открытых сторон пробоотборника (рис. 33) установлены двустворчатые затворы, кинематически связанные

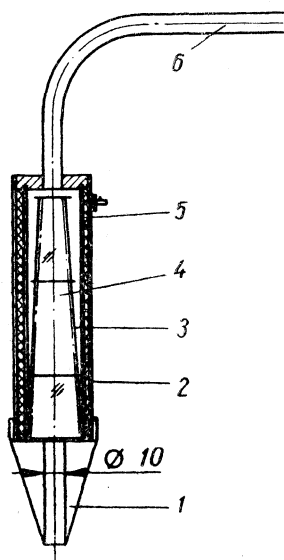


Рис. 31. Заборная трубка для внутренней фильтрации:

1 — наконечник; 2 — наружный кожух трубки; 3 — проволочный каркас для фильтра; 4 — матерчатый фильтр; 5 — нагревательная спираль; 6 — трубка.

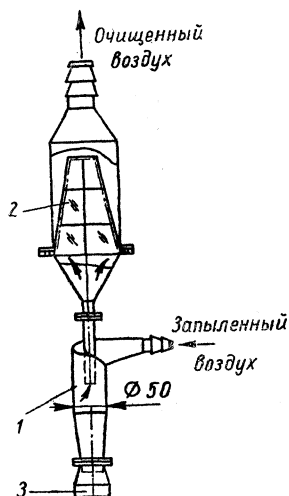


Рис. 32. Прибор для осаждения твердой фазы:

1 — циклончик; 2 — матерчатый фильтр; 3 — бункер для уловленного порошка.

с сердечником электромагнита таким образом, что при включении последнего обеспечивается одновременное закрытие открытых сторон корпуса.

Створки нижнего затвора с прикрепленными к ним покровными стеклами прячутся в ниши, находящиеся в боковых стенках корпуса. Благодаря этому покровные стекла защищены от воздействия запыленного потока и осаждения частиц на них до момента отбора пробы. Для удобства замены покровных стекол нижняя часть пробоотборника быстроразъемная. Пробоотборник закреплен на держателе, который своим вторым концом ввинчивается в диск, лежащий на нижней крышке камеры. В диске сделано отверстие для пропуска гибкой тяги к сердечнику электромагнита.



На рис. 33 представлена схема конструктивного выполнения пробоотборника, предназначенного для отбора проб при вертикальном потоке газозвеси. Разработан основанный на таком же принципе пробоотборник для отбора проб при любом направлении исследуемого потока газозвеси.

Развертка кадров киносъемки (рис. 34, см. вклейку) свидетельствует об очень быстром срабатывании затворов: на

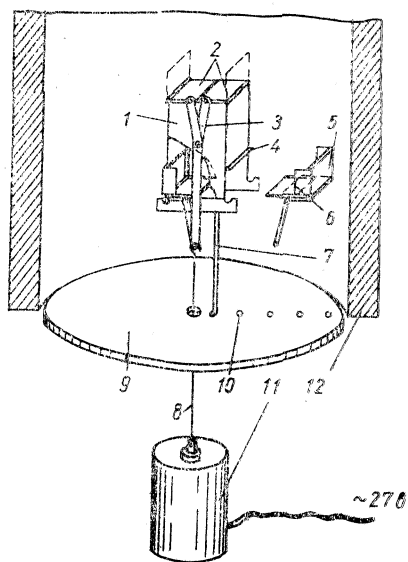


Рис. 33. Пробоотборник взвешенных в газе твердых частиц:

1 — корпус; 2 — створки затвора; 3 — жесткая тяга; 4 — козырек; 5 — ниша для размещения створки нижнего затвора; 6 — створка нижнего затвора с покровным стеклом; 7 — державка; 8 — гибкая тяга; 9 — диск; 10 — гнездо в диске для крепления державки; 11 — электромагнит; 12 — цилиндр модели взрывной камеры.

При установившейся и относительно невысокой концентрации частиц можно использовать аппаратуру, предназначенную для исследования пылевого фактора в атмосфере производственных помещений. В качестве фильтровального материала целесообразно применять, получивший в последнее время широкое внедрение, гидрофобный полимерный материал ФПП, разработанный в Физико-химическом институте им. Л. Я. Карпова [122]. Основными преимуществами таких фильтров являются: высокая эффективность пылеулавливания при линейных скоростях фильтрации до 100—150 см/сек; небольшое гидравлическое сопротивление; возможность взвешивания фильтров без сушки нагревом благодаря их гидрофобности; незначительный собственный вес (стандартный фильтр с площадью фильтрации 18 см<sup>2</sup> весит 60—70 мг), что повышает точность определений.

Недостаток фильтровального материала ФПП-15 — его малая механическая прочность, вследствие чего необходимо очень

осторожно производить замену фильтров в патроне; из-за высокого электростатического заряда на ткани, волокна ее могут прилипнуть и оставаться на патроне и защитных кольцах.

Из материала ФПП-15 промышленностью выпускает аналитические фильтры АФА-В-18 и АФА-В-10 с полезной площадью фильтрации соответственно 18 и 10 см<sup>2</sup>. Фильтры можно применять при температуре до 60° С.

При отборе проб фильтр помещают в патрон (рис. 35), который дает возможность использовать стандартные фильтры АФА-В-18, не освобождая их от защитных колец при установке в патроне. В отличие от других конструкций конус 1 и насадок 2 патрона соединяют не с помощью резьбы, а двумя болтами 3, шарнирно прикрепленными к ушкам 4 конуса.

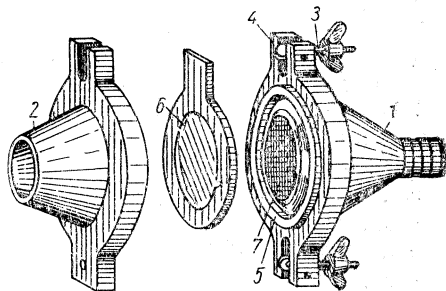


Рис. 35. Патрон для отбора проб пыли.

Герметизация соединения достигается благодаря резиновому кольцу 5, установленному в кольцевой канавке с клиновидным поперечным сечением и предусмотренному как в конусе, так и в насадке патрона. Принятый способ соединения исключает возможность смещения фильтра 6 относительно конуса в момент прижатия насадка к конусу. При использовании соединения на резьбе такое смещение возможно. Отпадает необходимость в использовании кассет. Для предотвращения выгибания фильтра при просасывании воздуха предусмотрена сетка 7. Патрон изготовлен из алюминия, вес его около 200 г.

Для отбора проб из трубопроводов путем внешней его фильтрации через фильтр используется тот же патрон, но вместо насадка устанавливается второй конус, к штуцеру которого присоединяется резиновая трубка, соединяемая противоположным концом с пылезаборной трубкой.

Для просасывания воздуха через фильтры при наличии сжатого воздуха можно использовать эжекторы. В местах, где нет сжатого воздуха, применяют воздуходувки, электрические пылесосы. Наиболее распространен аспиратор, выпускаемый заводом «Красногвардеец». Недостатком его является небольшая производительность (прибором модели 822 завода «Красногвардеец» одновременно можно отбирать четыре пробы: две — при расходе воздуха от 1 до 20 л/мин и две — от 0,1 до 1,0 л/мин). Аспиратор не надежен в условиях повышенной влажности воздуха и не рассчитан на длительный непрерывный режим работы.

В местах, где нет сжатого воздуха и нельзя использовать из-за взрывоопасности приборы с электрическим приводом в

обычном исполнении, применяют аспираторы типа АЭР [123], снабженные стальными баллонами со сжатым воздухом, при помощи которого приводится в действие эжектор. Максимальное количество просасываемого воздуха 25 л/мин. Вес прибора АЭР-1 около 8 кг. Применяют также воздуходувки с питанием от аккумулятора, установленного в корпусе прибора. Недостатком последних, также как и АЭР, является их сравнительно большой вес, ограниченное время действия и обычно небольшая производительность по просасываемому воздуху. Аспиратор ППА [123] просасывает до 50 л/мин и создает разрежение до 120 мм вод. ст. Аспиратор ДН-1 просасывает до 180 л/мин, создавая напор до 235 мм вод. ст.

При исследовании потоков с высоким содержанием твердой фазы возникают трудности в определении скорости. Импульсные отверстия обычных пневмометрических трубок быстро забиваются пылью. Периодическая обратная продувка не устраняет этого.

В МЭИ [99] разработана трубка с непрерывной продувкой. Для ориентации трубки навстречу потоку в сильно деформированных полях скоростей используется пятиканальный шаровой зонд. Продувка производится из расчета выхода воздуха через импульсные отверстия со скоростью 10 м/сек. В качестве датчиков давления используются чувствительные мембраны в сочетании с тензостанцией.

### Определение концентрации взвешенных в газе частиц

Определив массу уловленной пыли и располагая данными о количестве газа, прошедшего через фильтр, можно рассчитать весовое содержание дисперсной фазы в 1 м<sup>3</sup> газа, т. е. определить концентрацию в весовых показателях. Кроме фильтрации газа через фильтр для осаждения взвешенных в газе частиц можно использовать методы, основанные на других физических эффектах: например электропреципитации, термопреципитации.

Фильтр с отобранной пробой частиц позволяет получить концентрацию и в счетных показателях — число частиц в 1 см<sup>3</sup>. Для этого при использовании материала ФПП фильтр с отобранной пробой растворяют в ксилоле (или другом растворителе, не вызывающем коагуляции частиц). После тщательного перемешивания отбирается часть суспензии для приготовления препарата и исследования его под микроскопом.

Предпринимаются попытки создания приборов, в которых дисперсная фаза выделяется, но в то же время обеспечивается непрерывное измерение концентрации. Свойство веществ поглощать β-лучи пропорционально массе, приходящейся на единицу

площади, перпендикулярной к направлению лучей, использовано в приборе (рис. 36), описанном в работе [124].

Лента 1 из фильтровальной ткани ФПП-15 прижимается пневматическим мембранным фиксатором 2 к контейнеру 3 источника  $\beta$ -излучения 4. За счет разрежения, создаваемого эжектором 5, запыленный газ засасывается в отверстие фиксатора и очищается в фильтре. Очищенный газ проходит через регу-

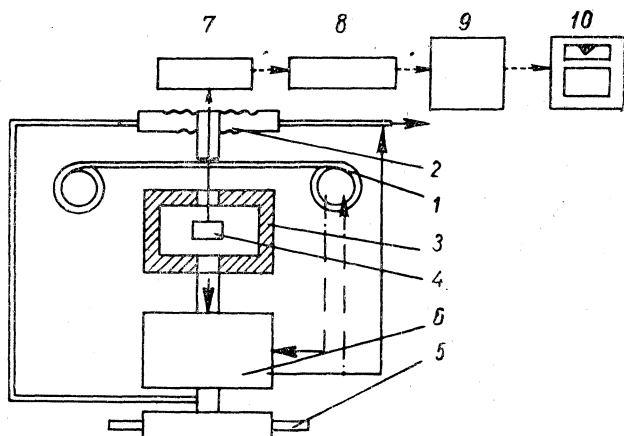


Рис. 36. Блок-схема автоматического прибора для измерения запыленности газа при помощи  $\beta$ -излучений.

лятор расхода 6. По мере увеличения массы пыли на фильтре поток  $\beta$ -лучей, достигающий сцинтилляционного счетчика 7, уменьшается. При этом выходное напряжение на счетчике возрастает. Это напряжение через низкочастотный фильтр 8 подается на вход дифференцирующего узла 9. Выходное напряжение дифференцирующего узла пропорционально скорости возрастания выходного напряжения сцинтилляционного счетчика и регистрируется вторичным прибором 10, проградуированным по весовой концентрации. Частота проб задается реле времени. Момент переключения кадра ленты определяется регулятором расхода воздуха, который по мере повышения сопротивления фильтра, а следовательно, и навески пыли, обеспечивает постоянство расхода просасываемого газа открыванием вентиля. При предельном открытии вентиля фиксатор освобождает ленту и включается механизм фильтропротяжного механизма и лента фильтра переключается на один кадр. При испытаниях опытного образца прибора погрешность составила  $\pm 12\%$ . К недостаткам прибора следует отнести сложность устройства и необходимость в мерах предосторожности против радиоактивного облучения. По этому же принципу построены приборы, описанные в работе [125].

Методы определения концентрации без выделения дисперсной фазы позволяют сразу получать результаты и вести измерения непрерывно. Кроме того, агрегаты частиц не разрушаются, как это наблюдается при отборе проб кониметрами или импинжерами, и не происходит обратный процесс — образование конгломератов частиц, как в счетчиках с оседанием пыли. Наиболее существенным недостатком этой группы методов является то, что концентрация в весовых показателях определяется не непосредственно, а косвенным путем. Для этого используют оптический эффект, электрические свойства частиц и др.

Оптические методы основаны на использовании эффекта рассеяния света взвешенными в газе частицами. Макеевским научно-исследовательским институтом (МакНИИ) разработано несколько приборов, основанных на принципе измерения, с помощью чувствительного фотоэлемента и гальванометра, ослабления интенсивности светового потока за счет абсорбции и рассеяния света, проходящего через запыленный воздух. Для высокой концентрации угольной пыли, включая взрывоопасную область ( $1-80 \text{ г/м}^3$ ), был разработан прибор ФПГ-6 [126].

В электронных кониметрах используется способность взвешенных в газе частиц электризоваться при высоких скоростях движения в потоках. Приборы, основанные на этом эффекте, в литературе известны также под названием контактно-электрических. Газ со взвешенными частицами просасывается с большой скоростью через канал. Частицы, получившие при прохождении канала электрический потенциал, отдают свои заряды экрану (зонду), который встречает на своем пути поток при истечении из канала. Импульсы усиливаются в усилителе, а микроамперметр показывает некоторую силу тока, которая зависит от числа пылевых частиц, проходящих через прибор в единицу времени, и может быть проградуирован для показания количества пылинок в  $1 \text{ см}^3$  воздуха. Сила тока, очевидно, должна быть пропорциональна площади поверхности частиц.

Приборы, работающие по описанному принципу, еще далеко не совершенны. Большая скорость воздуха в канале может приводить к разрушению агрегатов частиц и, следовательно, к искажению результатов. Закономерности возникновения и распределения зарядов, в зависимости от физических свойств пыли, исследованы пока еще очень мало.

Свойство частиц электризоваться в потоке положено в основу приборов НАМИ, Конитест и др. Прибор Конитест выпущен в Австрии [127] и предназначен для измерения запыленности газов в металлургическом производстве. Исследуемая газовзвесь через закручивающий аппарат входит в изолированную трубку из материала с высокими электризующими свойствами. Под действием центробежной силы содержащиеся в потоке частицы соприкасаются с внутренней поверхностью трубки, в результате

чего частицы и трубка приобретают электрические заряды. Заряд трубки отводится к земле, при этом усиливается и фиксируется измерительным прибором. Согласно работам [128, 129], между величиной тока и концентрацией пыли (если она не превышает  $3 \text{ г/м}^3$ ) существует линейная зависимость. Большой объем отбираемой пробы воздуха (до  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) обеспечивает представительность результатов измерений.

Принцип предварительного заряжения пыли с последующим определением заряда положен в основу датчика прибора для непрерывного определения запыленности, разработанного Центральной лабораторией автоматизации [130]. При этом исходят из существования определенной связи между величиной поверхности пыли в единице объема газа и ее зарядом.

Датчик (рис. 37) представляет собой трубку 1, в которую помещены коронирующий электрод — металлическое острие 2 — и другой электрод — короткий металлический цилиндр 3. К электродам подводится высокое напряжение переменного тока, вызывающее коронирование острия. Далее, по направлению потока газа, на трубку надет токоусъемный электрод — металлический цилиндр 4.

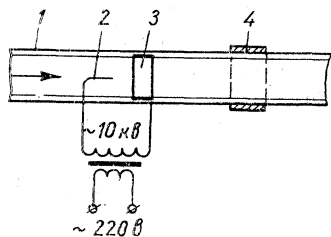


Рис. 37. Датчик прибора конструкции ЦЛА.

При прохождении запыленного газа через область электрической короны частицы получают переменный по величине и знаку заряд. В связи с этим на токоусъемном электроде наводится э. д. с. После усиления напряжение выпрямляется и измеряется с помощью потенциометра.

Недостатком прибора является зависимость показаний от свойств пыли, особенно от ее дисперсного состава. Не исключена также возможность разрушения агрегатов пыли при прохождении их через зону действия короны. Используемый в приборе принцип мало исследован.

Свойство акустического поля изменять параметры в зависимости от физических констант исследуемой газодисперсной системы положено в основу прибора, разработанного в ЦНИЛ\* [131]. В акустическое поле с частотой колебаний 5—6 кгц поступает газовзвесь. При этом происходит перераспределение параметров стоячей волны и поглощение части энергии звуковых колебаний, сопровождающееся изменением э. д. с. на приемнике. Прибор протарирован в весовых показателях запыленности.

\* Центральная научно-исследовательская лаборатория Госгортехнадзора.

В приборе, описанном в работе [132], частицы под действием силы тяжести осаждаются на чувствительную мембрану, при встрече с которой за счет кинетической энергии частиц возникают сигналы. Сигналы после соответствующего усиления фиксируются, и таким образом определяется счетная концентрация частиц. Осаждение проводили в сильно разреженном воздухе (0,1—10 тор) в камере, на дне которой находился электродинамический микрофон с мембраной, свободно лежащей на слое пенопласта (для защиты от посторонних шумов). Исследуемый аэрозоль вводили в камеру через отверстие 0,5 мм. Современные микрофоны и усилители дают возможность улавливать возмущения с энергией 0,1 эрг. Как утверждают авторы статьи [132], сигналы от частиц 5 мк принимать нетрудно. Однако создание конструкции прибора, основанного на таком принципе, связано с серьезными техническими трудностями (устранение влияния посторонних шумов, способ подачи аэрозоля в камеру и поддержание при этом постоянным высокого разрежения в ней и др.).

Осуществление непрерывной регистрации концентрации пыли приборами, основанными на методах исследования без выделения дисперсной фазы аэрозоля, расширяет возможности решения многих практических задач. Однако конструкции таких приборов еще несовершенны. Оценка различных принципов и многочисленных конструкций приборов возможна на основании всесторонних сравнительных испытаний. К сожалению, таких работ проводится очень мало и отсутствие данных по сравнительной оценке приборов мешает, как нам представляется, сосредоточить внимание специалистов на наиболее перспективных направлениях и в итоге создать совершенные приборы.

### Определение дисперсного состава

Известно много различных методов определения дисперсности взвешенных в газе частиц. По свидетельству Е. Иверса [133], существует более 100 методов. Остановимся на приборах, которые нашли применение, а также на перспективных направлениях.

В основу большинства приборов положен один из следующих принципов:

микроскопии препаратов взвешенных в газе частиц (порошка), полученных с помощью одного из приборов (кониметра, термопреципитатора, импинжера, седиментационных счетчиков и др.) \* или путем отбора пробы на фильтры; разделения порошков на фракции по седиментационной скорости оседания; под действием инерционных сил; в поле центробежных сил.

---

\* В автоматических счетчиках получение препаратов и подсчет частиц совмещены в одном приборе.

Если порошок наряду с мелкими частицами содержит грубые фракции, для отделения последних используют ситовой анализ. Самое мелкое сито, которое применяется в СССР, имеет отверстие 44 мк. В последнее время за рубежом появились микросита с размерами отверстий от 10 до 120 мк [134] и даже 5 мк.

Не останавливаясь на методике дисперсометрических исследований методами микроскопии, подробно освещенной в литературе [100], отметим, что кроме обычного набора набора предметов (при использовании микроскопа для подсчета частиц) применяют обычно окулярную сетку или счетную измерительную сетку Вигдорчика. Кратность увеличения принимается в зависимости от крупности исследуемых частиц.

Трудоемкость процесса подсчета препаратов под микроскопом и неизбежные при этом «индивидуальные» ошибки оператора устраняются применением автоматических счетчиков [135]. В СССР фотоэлектрический счетчик разработан В. С. Соколовым. В США рекламируются фотоэлектрические счетчики с непрерывным подсчетом частиц в пределах 0,3—100 мк с 16 различными интервалами крупности [136]. Продолжительность одного измерения в приборе модели 202-А может составлять 0,3; 1 или 10 мин; количество просасываемого воздуха до 300 см<sup>3</sup>/мин с 0—50-кратным разжижением исследуемого аэрозоля; пределы измеряемой концентрации 0—5 000 частиц/см<sup>3</sup>.

В предложенных конструкциях счетчиков используется фотоэлектрический эффект. Узкий пучок света при встрече с частицей изменяет свою интенсивность. Фотоэлемент преобразует эти модуляции в фототок, который затем проходит электронную обработку. Трудности связаны с необходимостью измерения каждой произвольно ориентированной частицы; при этом должен быть исключен повторный подсчет одной и той же частицы, так же как и регистрация нескольких частиц за одну.

Точное определение проектированных размеров частиц неправильной формы возможно, если определить длины частицы в серии параллельных дорожек; в таком случае сигнал, соответствующий сумме этих длин, будет пропорционален «проектированной» площади частицы (рис. 38). Существует два критерия для того, чтобы различить, относятся ли два последовательных сигнала к одной частице или к различным. Первый — критерий допусков [137]. Он определяет принадлежность сигнала к новой частице, если сигнал лежит за пределами принятого допуска. При высокой степени полидисперсности частиц в исследуемом

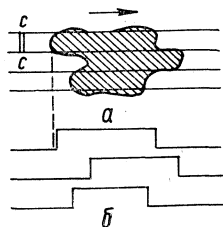


Рис. 38. Метод параллельных дорожек для подсчета частиц:

*a* — препарат; *б* — форма электросигналов; *с-с* — щель, через которую проходит узкий пучок света.



препарате, и когда контуры частиц ориентированы параллельно дорожкам, возникают трудности в определении значений допуска.

Второй критерий — критерий наложения [138] — определяет принадлежность двух сигналов из соседних дорожек к одной и той же частице, если они перекрывают друг друга. Трудности связаны с необходимостью прибавлять вновь принятый сигнал к измеренной до этого сумме длин сигналов лишь в следующей строчке, т. е. с отставанием во времени, после того как будет установлено на основании критерия наложения, что происхождение сигнала обязано той же частице. Если же сигнал получен

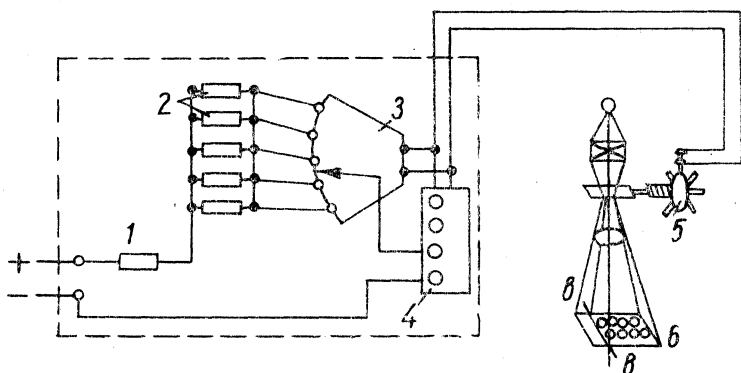


Рис. 39. Схема полуавтоматического прибора для подсчета частиц и получения распределения размеров:

1 — общий счетчик; 2 — счетчики; 3 — искатель; 4 — кнопочное управление; 5 — импульсная группа; 6 — экран.

от новой частицы, то начинается новый подсчет [139]. Автор работы [140] предложил в качестве замедляющего звена использовать специальный магнитный замедлитель, синхронно связанный с движением следящего устройства. Данный метод позволяет получать дифференциальную кривую распределения.

Автоматические счетчики еще несовершенны, они дороги и сложны. Поэтому заслуживает внимания опыт Л. В. Радушкевича, Е. А. Леонтьева и В. А. Колганова, разработавших на основе стандартной телефонной аппаратуры полуавтоматическую установку для получения гистограмм распределения крупности частиц [141].

При помощи проекционного прибора (рис. 39), снабженного микрометрическим винтом с шагом 1 мм, изображение с негатива проецируется на экран с нанесенным визиром  $v-v$ . Винт снабжен колесом с зубцами, над которыми укреплен пружинный ключ с контактами, представляющий собой импульсную группу. Каждый из зубцов, воздействуя на ключ, замыкает ток в электрической схеме; при этом возникает кратковременный импульс в телефонном искателе ШИ-17 на 17 положений. В зависимости

от числа импульсов, возникающих при прохождении изображения частицы, рычаг искателя занимает определенное положение, и после нажатия кнопки показания перемещаются на единицу в одном из 17 обычных телефонных счетчиков, соединенных с искателем. Это дает возможность получить гистограммы распределения из 17 групп частиц. Кроме того, имеется один накапливающий счетчик для суммирования всех измерений частиц. По данным авторов работы [141], производительность подсчета прибором — 1000 частиц за 1 ч. Подсчет частиц производился по электронно-микроскопическим снимкам с увеличением 10 000. Шагу винта 1 мм соответствовал 0,1 мк исследуемого объекта. Минимальный размер частиц, поддающийся подсчету, — 0,02 мк.

Группа методик основана на принципе разделения порошков на фракции по седиментационной скорости оседания. Существуют методы разделения в воздухе и жидкостях. Метод *воздушной сепарации* довольно распространен в практике отечественных исследовательских институтов. Он основан на разделении пыли на фракции путем выдувания поднятых в воздух частиц восходящим ламинарным потоком воздуха в вертикальных цилиндрах с разными скоростями его движения. Частица уносится потоком, если скорость витания меньше скорости потока. Принимая различные, но определенные скорости воздушного потока в цилиндре и вводя частицы в потск, можно отдувать частицы определенных размеров, а остальные оставить в цилиндре. Скорость витания частиц определяется по формуле (II.3). Для упрощения расчетов приведен график (рис. 40). Дисперсный состав определяют по убыли веса насадки с пылью. При воздушной сепарации, как и при других методах, основанных на разделении пыли по седиментационной скорости, определяют седиментационный диаметр частиц. Подробное описание воздушного классификатора и методики приведены в работе [142].

К недостаткам рассматриваемого метода следует отнести длительность процесса сепарации в классификаторе: продолжительность отвеивания фракций меньше 5 мк — до 20 ч. Путем воздушной сепарации не удастся четко разделить порошок на фракции. Обычно все мелкие частицы объединяют во фракцию мельче 5 мк.

Неточность метода обусловлена отчасти тем, что очень трудно правильно установить время окончания отдува тонких фракций. Обычно отвеивание тонких фракций происходит неполностью и выход их занижен. Помимо этого, происходит налипание частиц на внутренние поверхности цилиндров и в каждой организации, по свидетельству П. А. Коузова [143], принимают различные меры против налипания и по-разному учитывают последствия этого явления.

Сопоставление результатов, полученных на воздушных классификаторах, затруднено из-за отсутствия единой методики по применению прибора и нормализации его конструктивных элементов.

Часть приборов основана на наблюдении за скоростью оседания частиц в неподвижной среде, в воздухе или жидкости.

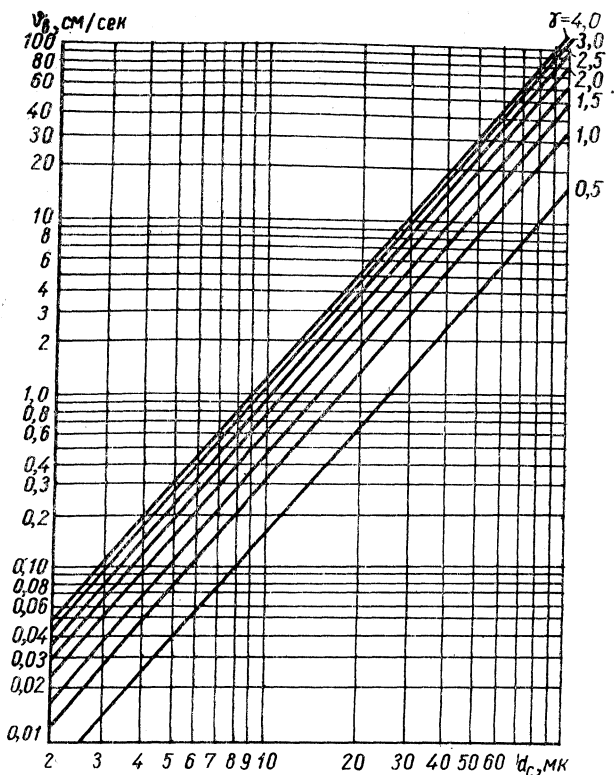


Рис. 40. Скорость оседания частиц различных размеров и плотности.

При оседании частиц в жидкости метод исследования принято называть также *седиментационным* анализом. Прибор Фигуровского, предназначенный для этого, подробно описан в работе [105]. По накоплению осадка на чашечке весов, осевшего из исследуемой суспензии, получают кривую осаждения. Интегральную кривую распределения крупности частиц получают графическим построением. Основное затруднение при обработке данных заключается в определении предельной величины накопленного на чашечке осадка. Определение предельного веса путем

вычисления веса твердой фазы в столбе суспензии над чашечкой, исходя из средней расчетной концентрации частиц в начале опыта, дает, очевидно, завышенное содержание тонких фракций, так как часть грубых фракций успевают вывалиться на дно цилиндра еще до установки чашечки, и общий вес осадка, регистрируемого прибором, уменьшается.

Погрешности, вызванные неодинаковой плотностью суспензии непосредственно под чашечкой и над нею и возникающими вследствие этого токами жидкости у края чашечки, рассматриваются в работе [144]. При этом изменяется траектория вертикально оседающих частиц и часть их минует чашечку, что вызывает занижение фактической навески. Предлагаются параметры конфигурации чашечки, при которых погрешность сводится до минимума.

Фирма Сарториус (ФРГ) выпускает автоматический седиментационный прибор [145]. Усовершенствования в новой модификации прибора [146] снизили погрешности, вызываемые неполнотой оседания частиц.

Седиментационный анализ проводят также с помощью так называемого *пипеточного* метода, широко используемого за рубежом. Сущность его заключается в определении концентрации дисперсной фазы в небольших пробах, отобранных пипеткой с определенной глубины седиментационного сосуда в фиксированные моменты времени, которым соответствуют определенные диаметры частиц пыли, осевших из суспензии. Известны различные модификации прибора. Цель усовершенствований — повысить точность определений [147]. Одна из модификаций прибора (рис. 41) отличается тем, что пипетка 1 расположена под дном цилиндра 2 и пробозаборная трубочка 3 введена в цилиндр снизу по его оси. Всасывающие отверстия 4 трубочки расположены на высоте 40 мм от дна цилиндра. Такое расположение пипетки обеспечивает более равномерное подтекание суспензии к трубочке при отборе пробы (в пробу попадают частицы из слоев, расположенных ниже всасывающих отверстий), а также уменьшается осаждение частиц на стенках пробозаборной трубочки. Порядок измерений пипеточным прибором сводится к следующему.

Исследуемый порошок тщательно взмучивают в жидкости и полученной суспензией заполняют цилиндр. Через определенные промежутки времени поворотом крана цилиндр соединяют с пипеточным сосудом и последний заполняется жидкостью, перетекаемой из цилиндра. С течением времени происходит сбраживание суспензии грубыми фракциями. В некоторый момент

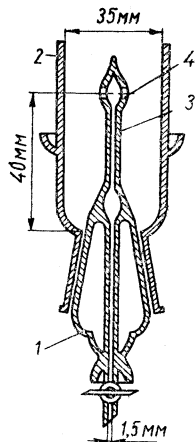


Рис. 41. Пипеточный прибор с выпуском проб суспензии через дно.

т от начала опыта полностью выпадают из столба  $h$  частицы, оседающие со скоростью большей, чем  $v_b = \frac{h}{\tau}$ . Определяя изменение концентрации суспензии через определенные отрезки времени, получают распределение частиц по фракциям в весовом выражении. Концентрацию пыли определяют путем выпаривания жидкости и отнесения навески к объему отобранной пробы суспензии в пипетку.

Величина необходимой навески зависит от содержания в ней фракции пыли мельче 5  $\mu\text{к}$ : при 20% требуется навеска 250  $\text{мг}$ , а при 50% — 50  $\text{мг}$ . Пипеточный прибор определяет фракции от 40 до 2  $\mu\text{к}$  довольно точно. Прибор отличается простотой устройства.

Трудности при седиментационном анализе связаны с обеспечением условий, при которых частицы сохраняли бы те же размеры, что и во взвешенном в газе состоянии. В процессе отбора пробы методом фильтрации или осаждения в каком-либо пылеуловителе почти неизбежна агломерация и даже агрегация\* частиц. Поэтому распределение размеров частиц при анализе пылевых проб, отобранных на фильтры, независимо от метода анализа, может отличаться от распределения размеров витающих пылинков. Это относится, естественно, и к методу воздушной сепарации, т. е. ко всем случаям, когда пробу пыли необходимо получать в виде порошка.

При седиментационном анализе в определенной мере данный вопрос решается применением пептизаторов — веществ, способствующих разрушению образовавшихся агрегатов. Однако процесс пептизации иногда может приводить к появлению и более мелких частиц в результате разрушения агрегатов, первоначально содержащихся в газозвеси. То же самое может происходить и при воздушной сепарации.

В технической литературе приводится обширный справочный материал по выбору седиментационных жидкостей и пептизаторов [147]. Несмотря на указания по применению дисперсионных сред и добавок к ним, рекомендуется [148] перед проведением серийных лабораторных анализов давать оценку выбранным дисперсионным жидкостям.

Для седиментационного анализа, главным образом, порошков, представляющих промышленный продукт, применяют *фотоседиментометры* (турбидиметры). Действие прибора основано на измерении рассеяния светового потока дисперсной фазой и жидкой средой. Диаметры частиц, которые к фиксированному

---

\* Под агрегатом принято понимать группу первичных частиц, связанных интенсивными силами сцепления, тогда как агломерат представляет собой совокупность частиц или агрегатов, связанных слабыми силами сцепления.

моменту времени опустились ниже плоскости светового луча, определяют, как и во всех других седиментационных приборах, по формуле седиментационной скорости (II.3). Исходя из изменения величины фототока, пропорциональной поверхности частиц, можно для каждой фракции вычислить ее суммарную поверхность, а следовательно, и ее долю в общем весе дисперсной фазы. Существуют конструкции прибора, создающие узкий пучок света, который пересекает кювету с исследуемой суспензией, и расходящийся под углом  $50^\circ$  пучок. Сравнительные испытания этих приборов на кварцевом и известковом порошках [149] показали хорошую совпадаемость измерений; стандартное отклонение результатов от средней величины в интервале крупности частиц 2—40 мк для обоих приборов было приблизительно одинаковым — около 2%.

В. М. Чегорян и соавторы [150] с помощью фотоседиментационного метода получили данные о дисперсном составе металлических порошков (Fe, Al, Pb, Mo), сопоставимые с данными микроскопического и пипеточного методов.

Сведения о различных модификациях фотоседиментационного метода можно найти в обзорной работе [153]. Приборы, основанные на этом принципе, легко поддаются автоматизации [151, 152].

*Аэрозольный фотоседиментометр* с автоматической записью измерений разработан в МакНИИ [154]. Он отличается тем, что оседание частиц происходит в воздушной среде, а не в жидкости. В аэрозольной камере создается разрежение до 400—600 мм рт. ст. В верхней крышке камеры имеется воздуховыпускная трубка, при открывании которой под действием разрежения происходит мгновенное засасывание воздуха с исследуемым порошком в камеру; при этом порошок распыляется. Для анализа требуется навеска порошка 20—100 мг. Диапазон измеряемых размеров частиц 2—70 мк.

Недостатки методов, при которых пробу льют необходимо получать в порошке, уже отмечались. Представляют интерес способы разделения частиц на фракции за счет *эффекта седиментации* непосредственно из *воздушного потока*. В работе [155] сообщается об исследованиях способа разделения частиц на фракции осаждением из разреженного потока воздуха. Частицы, попадая с потоком в седиментационную камеру, движутся по параболам и выпадают с разделением по крупности на дно камеры. Благодаря разрежению форсируется процесс осаждения. Для частиц от 1 до 20 мк рекомендуемое давление в камере 0,1 мм рт. ст., а число Кнудсена (отношение длины пробега газовых молекул к диаметру частиц) — около 1. Оседание частиц при этом происходит не по закону Стокса, а по закону трения Эпштейна. Бенарье [156], наблюдавший оседание частиц в неподвижном разреженном воздухе, получил, что при скорости

оседания меньше 10 см/сек, диаметре частиц 7,5—50 мк и давлении воздуха 10—10<sup>3</sup> мм вод. ст. результаты хорошо согласуются с законом Стокса — Кённингема.

Принцип разделения пыли на фракции под действием *инерционных сил* положен в основу *каскадного импактора*. Прибор, выпускаемый фирмой Казелла [157], имеет четыре насадка с уменьшающимися диаметрами и увеличивающейся скоростью истечения и разделяет пробу пыли на четыре фракции. Для улавливания высокодисперсных фракций в приборе можно установить фильтр (после последнего каскада). Прибор дает неполное разделение пыли на фракции; однако по среднему размеру частиц и массе осадка в каждом каскаде с достаточной для практики точностью можно судить о дисперсности пыли. Каскадный импактор позволяет определять распределение частиц по размерам непосредственно в пробе забираемого воздуха; пробы можно отбирать как из вентиляционных потоков и атмосферы, так и из трубопроводов. К преимуществам прибора следует также отнести простоту его устройства.

К этой же категории приборов можно отнести каскадный импинжер. Однако импинжер хуже задерживает тонкие фракции пыли и дает счетное распределение размеров частиц.

В центробежном поле представляется возможным получить силу, во много раз превосходящую силу земного притяжения, и тем самым интенсифицировать процесс разделения порошка на фракции. Обычные центрифуги пригодны лишь для осаждения частиц с размерами крупнее 1—2 мк. В суперцентрифуге возможно осаждение частиц с размерами порядка десятых долей микрона.

В приборах, основанных на принципе разделения пыли на фракции в поле центробежных сил, осаждение частиц осуществляется непосредственно из исследуемой пробы воздуха [158], из суспензии, или же в поле центробежных сил исследуется порошок.

В аэрозольной конической суперцентрифуге [158] определяют распределение размеров частиц с седиментационным диаметром 0,05—5 мк. Частицы из ламинарного потока осаждаются в сильном центробежном поле (увеличивающем ускорение силы тяжести более чем в 20 000 раз) на съемную полосу из фольги. Препарат — развернутый лист фольги — исследуется под микроскопом. Для этого обычный микроскоп оборудуется специальным столиком со спиральным координатником.

Разделение частиц в конических центрифугах по их размерам, по свидетельству авторов [88, 158], весьма совершенно: частицы соответствующего размера равномерно осаждаются на определенном участке по длине спирали, за пределами которого они вообще отсутствуют. Прибор тарируют для существующих значений оборотов ротора и диаметра насадков. Аэрозоль для

тарирования прибора получают распылением суспензии полистиролового латекса, частицы которого имеют шарообразную форму и плотность, равную единице. В результате получают данные об интервале крупности частиц (седиментационного диаметра), осаждающихся на любом из участков спирали при соответствующих значениях оборотов ротора и диаметра насадков. Определяя число частиц, осевших на соответствующих участках спирали из исследуемого аэрозоля, и зная объем прошедшего через прибор воздуха, определяют распределение частиц по крупности в счетном выражении. Вопросам теории аэрозольной конической центрифуги посвящена работа [159].

Для определения распределения частиц порошка по размерам выпускают центробежный сепаратор Бако (Франция). Разделение на фракции достигается изменением радиальной составляющей скорости воздуха (изменением гидравлического сопротивления коллектора). Центробежный сепаратор разделяет порошок на восемь фракций в пределах 3—70 мк. Число фракций может быть увеличено до 16 за счет уменьшения диапазона между ними. Прибор дает весовое распределение фракций. Длительность одного анализа 2 ч. Минимально необходимая навеска пробы 10 г.

Метод разделения порошков на фракции в *поле центробежных сил в суспензиях* позволяет просто осуществить автоматическую регистрацию распределения частиц по крупности, используя фотоэлектрический эффект [160]. Однако данный метод имеет недостатки, вообще свойственные седиментометрам.

В работе [161] описан способ седиментометрического анализа с непрерывной регистрацией веса накопленного осадка в центрифуге. Передача информации от вращающейся части прибора к неподвижной осуществляется фотометрической системой. В работе [162] сообщается о дисперсионном анализе порошков с использованием центробежного оптического седиментометра. Исследуемая суспензия находится в закрытом вращающемся прозрачном сосуде, через периферийную часть которого пропускается световой луч; по ослаблению его интенсивности частицами, отбрасываемыми центробежной силой к периферийной части сосуда, можно судить о распределении размеров частиц. По данным [162], седиментометр может быть использован для анализа частиц размером 0,3—30 мк. Следует остановиться еще на некоторых методах дисперсионного анализа, описанных в работах последнего времени.

О разделении высокодисперсных частиц на фракции в *электростатическом классификаторе* сообщается в [163]: в поле параллельных металлических пластин заряженные частицы перемещаются со скоростью, пропорциональной своим зарядам и обратно пропорциональной сопротивлению воздуха. Разделение на фракции возможно, если частицы одинаковой величины



имеют одинаковый заряд. Частицы заряжали коронирующим устройством, зону которого аэрозоль проходил со скоростью 20 м/сек. Количество просасываемого воздуха составляло 12 л/мин. Струя аэрозоля во избежание потерь пылинок была окружена слоем чистого воздуха. По данным авторов, заряд частиц размером меньше 0,1 мк пропорционален  $d^{1.5}$ , в отличие от частиц размером больше 0,1 мк, заряд которых пропорционален квадрату их диаметра (т. е. площади поверхности).

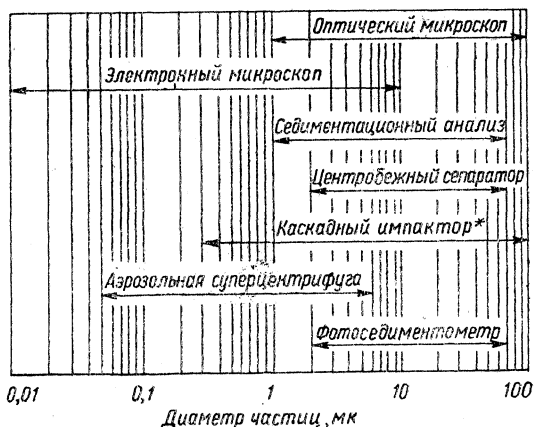


Рис. 42. Границы применения различных методов дисперсионного анализа порошков и пылей (\* — только для грубой оценки дисперсного состава).

В работе [164] сообщается о приборе, работающем по так называемому *кондуктометрическому* принципу. Между двумя погруженными в электропроводящий раствор электродами имеется перегородка с маленьким отверстием. В момент попадания взвешенной в растворе частицы в сечение отверстия изменяется сопротивление раствора. По изменению сопротивления судят о размере частицы, а по частоте изменения сопротивления — о количестве частиц. Необходимый объем суспензии изменяется от 50 до 200 см<sup>3</sup> с содержанием твердых частиц 1 мг/л — 5 г/л. Чувствительность прибора можно повысить сужением отверстия. Предел измерения — частицы 0,3 мк.

При выборе метода исследования дисперсного состава пыли или порошка необходимо исходить из требований к диапазону размеров исследуемых частиц, к точности определений, а также принимать во внимание физико-химические свойства дисперсной фазы.

На основании анализа данных о рассмотренных здесь приборах и материалах, описанных в работе [165], указаны границы применимости методов определения дисперсного состава пылей и порошков (рис. 42).

Диапазон размеров частиц от нескольких микрон примерно до 100  $\mu\text{к}$ , наиболее опасный по взрываемости, охватывается методами оптической микроскопии, седиментационного анализа, фотоседиментации, центробежной сепарации, а также каскадным импактором. Последний может служить только для грубой оценки распределения крупности частиц. Диапазон размеров частиц в интервале от 10  $\mu\text{к}$  до десятых долей микрона, т. е. наиболее опасный в отношении пневмокониозоопасности, полностью охватывается только электронным микроскопом и суперцентрифугой.

Выполненная в Ленинградском институте охраны труда работа [143], по сравнительной оценке воздушного сепаратора, пипеточного прибора, фотоседиментометра и весов Н. А. Фигуровского, показала плохое согласование результатов. Это же наблюдали при использовании одного и того же метода, но при различных методиках проведения анализов и приборах неодинаковой конструкции. Из перечисленных приборов авторы работы [143] отдают предпочтение пипеточному методу. Следует отметить, что указанный метод в некоторых зарубежных странах рассматривается как «абсолютный» и включен в стандарты.

Аналогичная работа по сравнению различных приборов несколько позднее была выполнена Я. Шимечекком [166], а также Б. Янковским [167] и Г. Матиакком [168].

По наблюдениям В. Т. Самсонова [169], который определил с помощью центробежного сепаратора Бако распределение размеров частиц различных порошков, полученных механическим измельчением, экспериментальные точки хорошо совпадают с логарифмически нормальным распределением. Это, по мнению автора, свидетельствует о достоверности метода.

Учитывая состояние проблемы дисперсионного анализа порошков и пылей, очень важно унифицировать приборы и методики проведения анализов.

### Определение удельной поверхности порошков

Величина удельной поверхности  $S_{\text{II}}$  большинства металлических порошков, по данным И. М. Федорченко и Р. А. Андриевского [84], обычно колеблется от 0,01  $\text{м}^2/\text{г}$  до нескольких десятых квадратного метра на 1 г. В этой же работе приведены зависимости  $S_{\text{II}}$  от размеров частиц для порошков железа и никеля.

$$S_{\text{II}} = ae^{-bd}, \quad (\text{II.43})$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные.

По величине  $S_{\pi}$  ориентировочно оценивают степень дисперсности частиц, определяя их средний размер и принимая, что форма частиц шарообразная

$$d_{\text{ср}} = \frac{6}{S_{\pi}\rho}. \quad (\text{II.44})$$

Однако такая оценка приемлема лишь для порошков с формой частиц, приближающейся к сферической. Для вихревых порошков, по данным И. М. Федорченко [84], отношение фактической  $S_{\pi}$  к удельной поверхности сферических частиц того же размера может достигать 10—14.

Если воспользоваться объемным коэффициентом  $a_v$  и применить понятие о поверхностном коэффициенте формы  $a_s$ , по аналогии с  $a_v$ , относительно площади поверхности частиц, удельная поверхность системы частиц может быть выражена как

$$S_{\pi} = \frac{a_s \Sigma N a^2}{\rho a_v \Sigma N d^3}. \quad (\text{II.45})$$

Эту зависимость можно представить в виде

$$S_{\pi} = C \rho^{-1} \bar{d}^{-1}, \quad (\text{II.46})$$

где  $C = \frac{a_s}{a_v}$ ;  $\bar{d} = \Sigma N d^3 / \Sigma N d^2$  — средний диаметр группы частиц.

Коэффициент  $C$  рассматривается как комплексный коэффициент формы, учитывающий кроме геометрии частиц текстуру поверхности. Таким образом, формула (II.46), в отличие от (II.44), учитывает также форму частиц.

Для определения удельной поверхности применяют *метод воздушной проницаемости*, основанный на измерении сопротивления движению воздуха сквозь спрессованный слой твердых частиц. По такому принципу работает прибор Товарова [170]. Результаты определений данным методом можно рассматривать как ориентировочные, приемлемые только для грубых порошков с размерами частиц крупнее 100 мк.

Более точен и совершенен прибор Б. В. Дерягина [171], основанный на измерении гидравлического сопротивления просасываемого через слой частиц сильно разреженного воздуха. При этом измеряются поверхности частиц, сквозных пор и трещин в них. Разрежение принимается таким, что длина свободного пробега молекул газа больше размеров пор. Соударения молекул между собой крайне редки по сравнению с ударами о стенки пор, т. е. обеспечивается кнудсеновский режим течения.

Располагая данными, сравнивающими результаты измерения удельной поверхности металлических порошков адсорбционными методами, авторы работы [84] рекомендуют использовать метод

Б. В. Дерягина преимущественно для измерения порошков с округлой формой частиц, без тупиковых и извилистых пор.

Для таких порошков точнее определять удельную поверхность по методу нестационарной фильтрации разреженного газа [172]. Начальное давление в системе принимают равным  $5-8 \times 10^{-3}$  мм рт. ст., затем впускают воздух, который просачивается через слой исследуемого порошка. При этом фиксируется динамика изменения давления за слоем порошка и определяется время запаздывания выравнивания давлений. Недостаток метода заключается в потребности, при порошках с небольшими удельными поверхностями (до  $1 \text{ м}^2/\text{г}$ ), относительно большой массы пробы — около 300—400 г и больше.

Наиболее точны адсорбционные методы, основанные на том, что количество адсорбированного газа пропорционально суммарной площади поверхности частиц. О количестве адсорбированного газа судят либо по изменению давления газа в сосуде после помещения в него пробы пыли с предварительно удаленной адсорбционно-газовой пленкой, либо по изменению веса этой пробы [173].

В качестве адсорбируемого газа используют азот или криптон. Одна молекула азота покрывает поверхность в  $16,2 \text{ \AA}^2$ , а криптона —  $22 \text{ \AA}^2$ ; в соответствии с этим при температуре  $77,5^\circ \text{K}$  и толщине адсорбционной пленки в одну молекулу на  $1 \text{ мкг}$  азота приходится  $34,8 \text{ см}^2$  поверхности вещества, а на  $1 \text{ мкг}$  криптона —  $15 \text{ см}^2$ .

Распространена методика Брунауэра, Эммета и Теллера, основанная на эффекте низкотемпературной адсорбции азота [174, 175]. Согласно теории полимолекулярной адсорбции Брунауэра, Эммета и Теллера, зависимость количества адсорбированного газа от величины давления при постоянной температуре (изотерма адсорбции) описывается формулой

$$\frac{V}{V_m} = \frac{f \frac{P}{P_0}}{\left(1 - \frac{P}{P_0}\right) \left[1 + (f-1) \frac{P}{P_0}\right]}, \quad (\text{II.47})$$

где  $V$  — количество адсорбированного газа, определяемое при измерениях и нормальных условиях,  $\text{см}^3$ ;  $V_m$  — количество газа, покрывающее адсорбент насыщенным мономолекулярным слоем,  $\text{см}^3$ ;  $P$  — давление газа в равновесии с адсорбированным слоем, мм рт. ст.;  $P_0$  — давление насыщенных паров при температуре опыта, мм рт. ст.;  $f = \exp \Delta E$  — константа, где  $\Delta E$  — разность между теплотой адсорбции данного газа на адсорбенте при температуре опыта и теплотой его конденсации.

Величина  $V$  определяется по уменьшению его давления в замкнутом объеме

$$V = \frac{W\Delta P}{\left(1 + \frac{t^0}{273}\right) P_a}, \quad (II.48)$$

где  $W$  — объем системы, в которой производится адсорбция,  $см^3$ ;  $\Delta P$  — уменьшение давления газа в системе в результате адсорбции,  $мм рт. ст.$ ;  $t^0$  — комнатная температура,  $^{\circ}C$ ;  $P_a$  — атмосферное давление,  $мм рт. ст.$

Из уравнения (II.47) определяется величина  $V_m$ , пропорциональная поверхности порошка. В координатах  $\frac{P}{V(P_0 - P)}$  относительно  $\frac{P}{P_0}$  зависимость (II.47) в области ее применимости выражается прямой линией с угловым коэффициентом  $\frac{f-1}{fV_m}$  с отрезком  $\frac{1}{fV_m}$  на оси ординат (при  $\frac{P}{P_0} = 0$ ).

Определив  $V_m$ , удельную поверхность рассчитывают по формуле

$$S_n = \frac{V_m \omega}{m_a}, \quad (II.49)$$

где  $\omega$  — площадь, которую занимает 1  $см^3$  азота в виде мономолекулярной пленки при температуре кипения азота  $195,8^{\circ}C$ ; при этих условиях она равна  $4,4 м^2$ ;  $m_a$  — масса адсорбента,  $г$ .

Адсорбцию ведут в высоковакуумной установке. Недостатком метода является длительность анализа (5—6 ч) и его относительная сложность.

Во взрывной лаборатории ИПМ АН УССР применен упрощенный адсорбционный метод ВНИИТИСМ [176]. В методике использовано упрощение, внесенное в расчет Темкиным [177]. Он исходил из того, что  $f$  практически не зависит от природы адсорбента в условиях адсорбции азота при температуре его кипения;  $P_0$  и  $f$  зависят только от температуры, при которой происходит адсорбция. Дальнейшее упрощение достигнуто за счет отказа от глубокого вакуумирования и применения технического жидкого азота в качестве источника азота вместо азота натрия. Как показали опыты, среднее относительное отклонение по сравнению с результатами, полученными при глубоком вакуумировании, составляет 5,2%. На таком же уровне находится величина относительного отклонения по сравнению с данными, полученными в опытах с чистым азотом.

Принципиальная схема прибора показана на рис. 43. Для создания в приборе разрежения используют форвакуумный насос. Помещаемую в кювету массу пробы принимают такой, чтобы величина ее поверхности была больше  $5 \text{ м}^2$ , но меньше  $100 \text{ м}^2$ . Затем одновременно проводят дегазацию всех проб при температуре  $200^\circ \text{С}$  в вакууме  $10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$  После охлаждения кюветы соединяют с измерительной частью прибора и впускают в систему азот до давления  $150\text{—}220 \text{ мм рт. ст.}$  Затем от системы отключают все кюветы, кроме одной, и фиксируют показания дифференциального манометра. Кювету погружают в сосуд Дюара с жидким азотом и после установления адсорбционного равновесия ( $20\text{—}30 \text{ мин}$ ) фиксируют показания дифференциального и ртутного манометров.

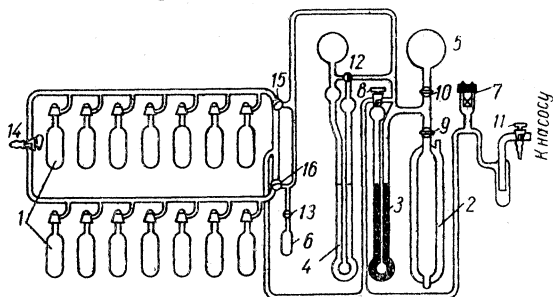


Рис. 43. Схема адсорбционного прибора:

1 — кювета; 2 — калиброванный сосуд Дюара; 3 — ртутный манометр; 4 — дифференциальный манометр; 5 — колба с запасом азота; 6 — ампула с активированным углем; 7 — манометрическая лампа; 8—16 — вакуумные краны.

Для серийных испытаний порошков в промышленных условиях разработаны *автоматические адсорбционные* приборы. Известны автоматические приборы, основанные на гравиметрических сорбционных определениях [178].

В автоматическом приборе — сорбтометре [179], выпускаемом в США, о величине удельной поверхности судят по изменению концентрации азота в потоке газа за счет азота, десорбированного с поверхности порошка при нагреве пробы. Изменение концентрации азота определяют, измеряя теплопроводность газа.

Другой автоматический прибор — бетограф [180] — работает по принципу фиксации изменения давления, сопровождающего процесс адсорбции. Давление воспринимают мембранные микроманометры, в которых изгиб мембраны преобразуется в электрический сигнал, фиксируемый самописцем.

Выбор метода измерения удельной поверхности зависит от характеристик исследуемого порошка и поставленной цели.

Большинство металлов в монолитном состоянии при нормальных условиях не способны воспламеняться и взрываться. При соприкосновении металла с кислородом воздуха обычно происходит экзотермический процесс окисления, однако ввиду замедленности процесса и значительного теплоотвода повышение температуры поверхности металла незначительно. При увеличении температуры окружающей среды процесс окисления происходит активнее. Особенно интенсивно тепло выделяется при размерах частиц менее 50—100 мк. Это вызвано резким увеличением удельной поверхности металла. Некоторые металлы в тонкоизмельченном состоянии способны воспламеняться и взрываться при температуре ниже 20° С. Так, не успевший окислиться тонкодисперсный железный порошок и порошки некоторых металлов способны воспламеняться даже при отрицательных температурах [181]. Взрывы и воспламенение порошков могут происходить в результате окисления и других экзотермических процессов, например при взаимодействии металлов (в частности магния) с азотом с образованием нитридов, с углекислым газом с образованием карбидов, т. е. в газовых средах, которые для большинства металлов являются инертными. Воспламенение порошков алюминия и магния в фреоне также приводит к сильным взрывам [182].

Металлические порошки взрываются, если они находятся во взвешенном состоянии. В состоянии геля металлические порошки не способны взрываться, но, будучи пожароопасными, могут стать источником возникновения взрыва в результате интенсивной реакции горения металлических частиц, взметывания порошка с образованием пылевого облака и его воспламенения.

Данными о степени пирофорности и взрывоопасности тех или иных порошков, их температурных показателях и характеристиках взрываемости необходимо располагать для создания взрывобезопасной технологии получения и применения порошков. Комплекс таких показателей, определяемых по специальным методикам, схематично изображен на рис. 44. Обычно исследуют партию порошка с химсоставом и свойствами — крупностью частиц, влажностью материала, степенью окисленности, — характерными для производственных условий. Учитывая возможность изменения физико-химических свойств порошков, характеристики пирофорности и взрываемости следует опреде-

лять в первую очередь для порошков, наиболее активных в условиях получения их в рассматриваемых производствах.

При полном исследовании пирофорности и взрываемости порошков необходимо также учитывать влияние следующих факторов: массы исследуемого порошка в слое или концентрации пыли; содержания кислорода и состава газовой среды; источников воспламенения, их размещения и энергии воспламенения; начального давления газа при испытаниях.

### Исследуемый порошок

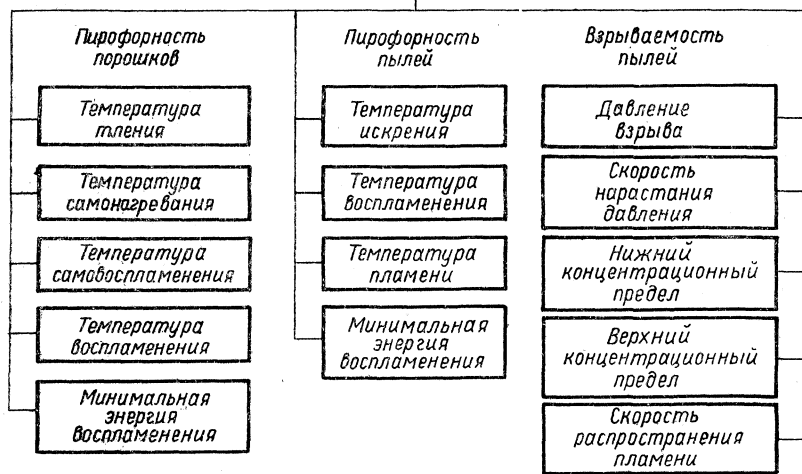


Рис. 44. Методическая схема исследований характеристик пирофорности и взрываемости порошков.

Каждый из перечисленных факторов существенно влияет на параметры воспламенения и взрыва и для возможности использования данных на практике должен фиксироваться, а условия проведения эксперимента должны соответствовать промышленным условиям.

Приведенная на рис. 44 методическая схема предусматривает исследование показателей, представляющих интерес для практики. Однако ввиду сложности и несовершенства методик исследования большинства включенных в схему параметров и отсутствия стандартной аппаратуры, полный комплекс таких исследований до настоящего времени не проводился. Обычно ограничиваются определением на одной — двух установках нескольких показателей пирофорности или взрывоопасности порошка.

В литературе данных о характеристиках пирофорности и взрываемости порошков и методах их исследования много



меньше, чем для газовых смесей. Особенно малочисленны сведения о взрываемости металлических порошков. В связи с методическими трудностями, встречающимися при изучении взрываемости порошков, о которых упоминают большинство исследователей, в данной главе основное внимание уделено методическим разработкам ИПМ АН УССР. Описаны также наиболее характерные методики исследования пирофорности и взрываемости порошков, приведены данные о характеристиках пирофорности и взрываемости металлических порошков.

Ввиду разноречивости опубликованных сведений о пирофорности и взрываемости порошков, в этой главе при изложении методов исследования будут представлены выборочные данные.

### ИСТОЧНИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

В натуральных условиях существуют самые разнообразные источники воспламенения и взрыва пыли. К ним относятся следующие:

- 1) нагретые предметы и поверхности;
- 2) открытое пламя (например, газовой горелки), пламя паяльной лампы; электрическая дуга;
- 3) искры электрического происхождения (электростатические разряды, искры размыкания, высоковольтные разряды);
- 4) искры механического происхождения (искры от трения и ударов, искры при резке и сварке);
- 5) химические реакции, сопровождающиеся выделением тепла.

При лабораторных испытаниях пирофорности и взрываемости порошков в качестве воспламенителей следует использовать источники, наиболее характерные для условий производства при получении или применении исследуемых порошков.

Существенную опасность в отношении воспламенения порошков помимо точечных кратковременных источников типа искр обычно представляет открытое пламя и раскаленные поверхности. Однако некоторые виды металлических порошков плохо воспламеняются от нагретых тел и довольно легко — от высоковольтных искр. Алюминиевый порошок крупностью около 40—50 мк вследствие наличия прочной окисной пленки менее чувствителен к инициатору в виде нагретого тела и в то же время легко воспламеняется от высоковольтной искры с энергией менее 0,1 мдж.

Выбор воспламенителя зависит от цели эксперимента. При определении минимальной энергии воспламенения удобнее использовать высоковольтные разряды с регулируемой и измеряемой энергией.

Наиболее распространены воспламенители именно такого типа для исследования взрываемости порошков в лабораторных установках. В качестве источника электроэнергии в этих случаях используют индукционные разряды и разряды конденсаторов.

Широко применяются воспламенители в виде нагреваемых до определенной температуры тел или поверхностей, а также раскаленная электрическим током спираль. Реже используют дуговые воспламенители, плавкие вставки, воспламенители из термитной смеси, изготовленные в форме пилюль с плавкими вставками (пиротехнические воспламенители).

Подробнее о некоторых типах воспламенителей и их параметрах будет сказано ниже.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИРОФОРНОСТИ ПОРОШКОВ

Порошки металлов и других материалов считаются пирофорными, если при определенных условиях они способны воспламеняться за счет внутренних экзотермических процессов, начавшихся в результате внешнего теплового импульса или происходящих в самом порошке химических процессов.

В качестве критериев пирофорности обычно принимают температурные показатели. Поэтому определение характеристик пирофорности порошков практически сводится к определению их температурных показателей и минимальной энергии воспламенения.

Прежде чем начать описание методик определения температурных показателей порошков, сформулируем понятия некоторых температурных показателей порошков.

*Температура самонагревания* — наименьшая температура, при которой в порошке возникает экзотермическая реакция от постороннего теплового импульса (температуры окружающей среды или нагретого тела).

*Температура тления* — наименьшая температура порошка, при которой в результате самонагревания возникает тление.

*Температура самовоспламенения* — наименьшая температура порошка, при которой резко увеличивается скорость экзотермического процесса, заканчивающегося самопроизвольным возникновением пламени.

*Температура воспламенения* — наименьшая температура порошка, при которой от постороннего источника воспламенения в порошке происходит резкое увеличение температуры за счет экзотермического процесса, заканчивающегося самопроизвольным возникновением пламени.

В специальной литературе до настоящего времени нет достаточно четкого определения отдельных температурных показателей, в связи с чем полученные экспериментально отдельными исследователями температурные показатели в ряде случаев именовались ошибочно.

Температурные показатели порошков в момент фиксации температуры существенно зависят помимо их физико-химических свойств от влажности и давления газа, газового состава атмосферы и других внешних условий. Поэтому найденные экспериментально значения температурных показателей нельзя считать физико-химическими константами. Однако определяемые по известным методикам температурные показатели, являясь относительными, позволяют судить о степени пирофорности порошков, характеризую их пожаро- и взрывоопасность.

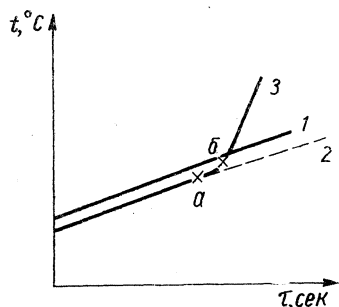


Рис. 45. График для определения критических температур.

Температурные показатели обычно определяют по данным визуальных наблюдений, а также по графикам изменения температуры образца во время испытаний.

На рис. 45 представлены графики изменения температур газа в печи и нагретого тела. Температура газа в печи при нагреве 1 практически изменяется прямо пропорционально времени нагрева. При испытании образца порошка из инертного материала температура его повышается с некоторым отставанием во времени.

по сравнению с температурой среды (рис. 45, кривая 2). Температура пирофорного порошка до определенного момента также повышается параллельно прямой роста температуры среды. При определенной температуре пирофорного порошка, соответствующей точке *а*, начинается саморазогрев порошка за счет экзотермической реакции окисления. Температура, соответствующая этому моменту, считается температурой самонагрева. Дальнейшее повышение температуры некоторых порошков за счет экзотермической реакции сопровождается определенное время тлением.

При интенсивном окислении порошка может произойти его самовоспламенение, сопровождающееся резким увеличением температуры и появлением пламени (см. рис. 45, точка *б*, кривая 3). Температуру, соответствующую этому моменту, считают температурой самовоспламенения порошка. Отрезок времени, в течение которого начавшаяся реакция самонагрева заканчивается самовоспламенением, называется *периодом индукции*.

Методы исследования пирофорных характеристик порошков обычно основаны на применении в качестве воспламенителей нагревательных приборов. В большинстве методов порошок нагревают при введении его в заранее нагретую до определенной температуры зону прибора, в других случаях порошок нагревают вместе с прибором. Методики обычно предусматривают возможность испытания порошка в неподвижной атмосфере и в токе газа. В случае проточной системы производят предварительную очистку газа от ненужных примесей и высушивают его. Температуру печи изменяют с помощью реостата и трансформатора. Регулирующие потенциометры позволяют автоматизировать этот процесс. В качестве датчиков температуры наиболее часто применяют термопары.

В данном разделе излагаются методы исследования пирофорности порошков в слое. О методах исследования пирофорности порошков в распыленном состоянии будет сказано ниже.

## Температура тления

При низкой температуре самонагревания пыли, осевшей на поверхности технологического оборудования, электроустановок, электропроводке, осветительных лампочек и других нагретых предметах, может возникнуть тление. Температура тления зависит от толщины слоя осевшей пыли и существенно снижается с увеличением толщины слоя до 10—20 мм.

В отечественной практике температуру тления определяют путем визуального наблюдения за процессом нагревания и ее фиксации при определении температур самонагревания, самовоспламенения и воспламенения по методикам, описанным ниже.

Недостаток такого метода определения температуры тления заключается в трудности фиксации момента начала тления образца в нагретой печи.

В Федеральном институте по испытанию материалов БАМ (ФРГ) для определения температуры тления применяется прибор, схема которого представлена на рис. 46, [186, 187] и методика, описанная в работе [188]. Порошок распределяется на нагреваемой пластине равномерным слоем определенной толщины. Пластина может быть открыта для свободного доступа воздуха и интенсивного теплообмена или помещаться в термостат, в котором процесс тления начинается при более низкой температуре.

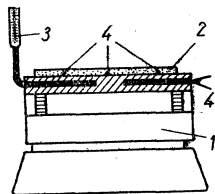


Рис. 46. Прибор для определения температуры тления:

1 — нагревательная печь; 2 — слой порошка; 3 — термометр; 4 — термопары

Андерсен и Бельц [189] определяли время сгорания слоя пыли в узкой щели длиной 25 см и наблюдали за процессом тления путем фотографирования.

Температура тления представляет особый интерес в случае легко воспламеняющихся порошков. Она является характерным показателем для порошков, имеющих температуру самонагрева ниже 600—700° С и в то же время не горящих пламенем или имеющих довольно высокую температуру самовоспламенения.

В литературе представлены сведения о температуре тления порошков органического происхождения. Данные по металлическим порошкам в опубликованной литературе практически отсутствуют.

По данным Ханеля [190], минимальная температура тления при оптимальной толщине слоя у угольной пыли 125° С, у пирита 150° С. Авторы работы [185] указывают температуры, при которых тлеют порошки ниобия, молибдена и вольфрама (390, 530 и 620° С соответственно), называя их температурами воспламенения. Температура тления порошков карбонильного железа, по данным ОКБ ИПМ АН УССР, составляет 500° С.

Следует указать, что с тлеющими порошками необходимо обращаться с особой осторожностью, поскольку даже при слабом встряхивании тлеющая масса может интенсивно воспламениться и вызвать взрыв, вследствие резкого притока кислорода воздуха.

### **Температура самонагрева и самовоспламенения порошков**

Температура самонагрева и самовоспламенения порошков определяется обычно на установках во время одного и того же опыта. Большинство авторов не различает терминов *температура самонагрева*, *температура самовоспламенения* и ошибочно называют найденную температуру самонагрева температурой самовоспламенения.

Из известных методик [183—185, 191—194] наиболее удачной является методика, разработанная в Московском институте стали и сплавов (МИСиС), с использованием дифференциально-термографического анализа по Н. С. Курнакову [195]. Установка МИСиС [194] состоит из шахтной печи (рис. 47) с регулируемым до 1000° С нагревом, в которой размещен стальной нагревательный блок. Навеску исследуемого порошка помещают в реакционную трубку на ложном дне из асбеста. Образец нагревают по заданному режиму и в процессе опыта дифференциальной термопарой измеряют разность температур исследуемого и эталонного порошка инертного материала с близкими теплофизическими характеристиками.

К недостаткам приведенной методики относятся изолированное расположение навески эталонного образца и неодинаковые условия обтекания образцов воздухом. Из установок для определения температуры самовоспламенения в потоке газов следует указать на установки, описанные в работах [34, 196].

При определении температур самонагревания и самовоспламенения порошков, как и других показателей, необходимо тщательно фиксировать все характеристики, влияющие на исследуемые показатели, а также учитывать особенности методик. В зависимости от условий температурные показатели для порошков одного и того же металла могут существенно отличаться.

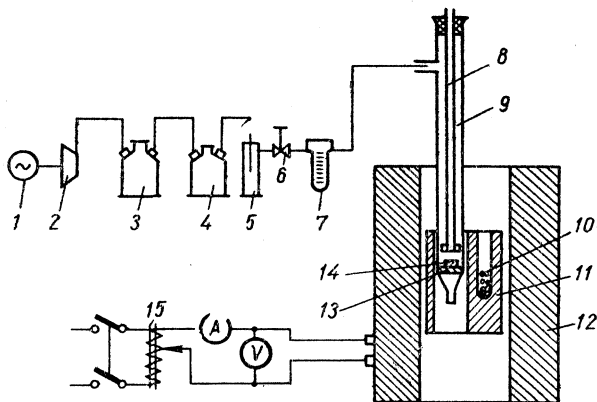


Рис. 47. Схема установки МИСиС для определения температуры самовоспламенения:

1 — электродвигатель; 2 — воздуходувка; 3 — ресивер; 4 — промывная склянка; 5 — осушительная колонка; 6 — регулировочный кран; 7 — реометр; 8 — трубка для термопар; 9 — реакционная трубка; 10 — эталон; 11 — нагревательный блок; 12 — печь; 13 — ложное дно; 14 — исследуемый образец; 15 — автотрансформатор.

ся. Так, для порошков циркония наряду с температурой самовоспламенения  $20^{\circ}\text{C}$  [194] приводятся величины  $190^{\circ}\text{C}$  [184],  $270^{\circ}\text{C}$  [185] и др. В действительности наблюдались случаи самовоспламенения порошков циркония при обычных атмосферных условиях. В большинстве случаев воспламенение происходило от разрядов статического электричества при пересыпках порошков. В спокойном состоянии порошки циркония воспламенялись при более высокой температуре.

## Температура воспламенения

Многие зарубежные исследователи четко не разделяют понятий температура воспламенения и температура самовоспламенения. В большинстве случаев найденную температуру само-

воспламенения порошка в слое принимают за температуру воспламенения [96, 193]. Температуру же воспламенения в понятии, изложенном в начале параграфа, обычно не определяют.

В отечественных работах описаны методики исследования воспламенения порошковых материалов от точечного источника нагрева в воздухе (рис. 48) [185] и в потоке газа (рис. 49) [196]. В первом случае точечным источником тепла служит спираль диаметром 2 мм из нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм. Спираль, нагретая до определенной температуры, кото-

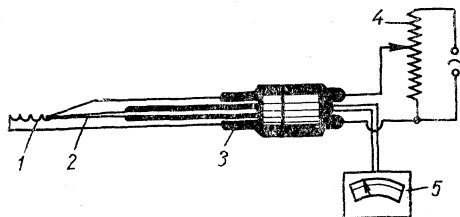


Рис. 48. Прибор для определения температуры воспламенения порошков:

1 — нихромовая спираль; 2 — термопара; 3 — рукоятка — блок изоляции; 4 — автотрансформатор; 5 — прибор для регистрации температур.

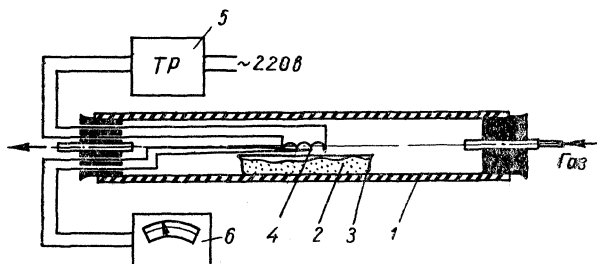


Рис. 49. Схема установки для исследования воспламеняемости порошков:

1 — кварцевая трубка; 2 — порошок; 3 — лодочка; 4 — спираль; 5 — трансформатор; 6 — гальванометр.

рая контролируется термопарой, вводится в исследуемый порошок. Температуру воспламенения определяют с помощью термопары, а факт воспламенения устанавливают визуально.

В работах [185, 197] приведены результаты измерения температур воспламенения некоторых металлических порошков. Авторы работы [185], сопоставляя величины температур самовоспламенения и воспламенения металлических порошков, пришли к выводу, что температура самовоспламенения порошков обычно ниже температуры воспламенения. Для порошков ниобия, тантала, циркония, титана они соответственно равны 290 и 390;

290 и 420; 270 и 420; 520 и 720° С. Это различие связано с большими тепловыми потерями в месте контакта воспламенителя с холодным порошком. По данным работы [197], температура воспламенения значительно ниже, для титана она равна 397° С, а для циркония 180° С.

### Минимальная энергия воспламенения

Минимальную энергию воспламенения порошка ориентировочно можно вычислить по формулам теплового баланса, если известна температура воспламенения порошка и время его нагрева до этой температуры. С помощью искровых установок минимальную энергию воспламенения слоя порошка определяют по минимальной энергии разряда, вызывающего воспламенение. Установки такого типа описаны в работах [198—200]. При необходимости навеску порошка можно располагать в камере с газом заданного состава.

Коллектив авторов из ВНИИПО [201] приводит результаты измерений минимальной энергии воспламенения некоторых металлических порошков в слое (*мдж*): алюминия — 1,6; тория — 0,004; ферромарганца — 8; титана — 0,008; циркония — 0,0004. Минимальная энергия воспламенения порошков во взвешенном состоянии значительно выше, чем в слое: для алюминия — в 6, а для циркония — в 12 000 раз

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВАЕМОСТИ ПОРОШКОВ

Попытки исследовать процесс взрыва порошков предпринимались еще в конце прошлого века [202, 203] и были вызваны случаями взрывов пыли на производстве, в основном, в угольной и пищевой промышленности. Развитие в конце XIX века алюминиево-бронзовой промышленности побудило к исследованию взрывоопасности металлических порошков, и в первую очередь — алюминиевых [204]. Методы исследования взрываемости особенно интенсивно начали разрабатываться с 20—30-х годов. Исследователи, стремясь определить некоторые параметры взрываемости, в частности н.к.п., температуру воспламенения пылевого облака и давление, развиваемое при взрыве, создавали установки, используя различные схемы получения облака. Как указывают все исследователи, основные трудности связаны с необходимостью качественной диспергации пылевых частиц, продуцирования облака с равномерным распределением частиц и обеспечения контроля концентрации. Этим, в значительной мере, обусловлена разноречивость опубликованных данных о взрывае-



мости порошков, в том числе по н.к.п. Так, величина н.к.п. для алюминиевой пыли, согласно данным различных авторов, изменяется в пределах 7—422 мг/л [86, 205—208].

Параметры, подлежащие определению при исследованиях характеристик взрываемости порошков, и факторы, от которых они зависят, рассмотрены в начале данной главы. В зависимости от поставленной задачи применяют те или иные методики.

Для исследования взрываемости порошков созданы установки следующих основных типов: *поточные* незамкнутые — с направлением запыленного потока вниз [203, 209], вверх [210, 211] или циркуляционные — в замкнутом объеме [212, 213], а также установки *импульсного* действия с герметичными взрывными камерами цилиндрической или сферической формы с распылением порошка вниз кратковременно впускаемым сжатым газом [214, 215] с распылением вверх [205, 218—222] или рассредоточенно [223—224].

Поточные установки способны создавать запыленные потоки с более равномерной концентрацией, однако в них плохо диспергируются порошки из-за распыления их потоком, движущимся со сравнительно небольшой скоростью.

В установках открытого типа невозможно замерять такие параметры как максимальное давление взрыва и скорость нарастания давления. В замкнутых установках с циркуляцией в результате действия инерционных сил наблюдается неравномерное распределение концентрации и не остается постоянным дисперсный состав.

К существенным недостаткам установок импульсного действия относится неравномерное в большинстве случаев распределение концентрации металлических порошков (во времени и в пространстве взрывной камеры), что может привести к значительным ошибкам, особенно при определении концентрационных пределов, так как концентрацию находят делением массы порошка на объем пылевого облака.

Общий недостаток всех известных методов — отсутствие контроля концентрации пылевого облака в момент взрыва.

Кроме основных узлов установок для исследования взрываемости порошков — систем распыления порошка и воспламенения — некоторые установки снабжаются устройствами для измерения давления, скорости его нарастания при взрыве, а также температуры пламени, окнами (при применении непрозрачных камер) для визуального наблюдения за процессом взрыва и его фотографирования.

Большинство установок для исследования характеристик взрываемости порошков были созданы в связи с потребностью отдельных производств и использовались обычно для исследования небольшого числа материалов, характерных для данного производства. Основные исследовательские работы проводились

для горной (уголь, сера) и пищевой промышленности (сахар, мука, крахмал), а позднее — металлургической промышленности и промышленности пластмасс.

Систематические исследования характеристик взрываемости металлических порошков начаты в 40-х годах в Горном бюро США [86]. Методика проведения исследований, принятая в Горном бюро, описана в работе [193]. Аналогичная методика исследований взрываемости порошков принята в БАМ в ФРГ, где разработан и проводится комплекс исследований порошков для оценки их пирофорности и взрывоопасности [192].

В Советском Союзе исследования взрываемости порошков проводятся во Всесоюзном научно-исследовательском институте противопожарной обороны МВД СССР (ВНИИПО), Макеевском и Восточном научно-исследовательских институтах по безопасности работ в угольной промышленности (МакНИИ и ВостНИИ), в Институте УНИПРОмедь, Московском институте стали и сплавов (МИСиС), Институте проблем материаловедения АН УССР. Из перечисленных институтов вопросами исследования взрываемости металлических порошков фактически занимаются только в МИСиС и ИПМ АН УССР. Коротко остановимся на описании некоторых, наиболее распространенных методик.

Взрывная камера Горного бюро США представляет собой вертикальный металлический цилиндр диаметром 70 и высотой 305 мм. Пыль перед распылением равномерно располагается на поверхности нижней крышки чаши, выполненной в виде тороидального сегмента. Пылевое облако создается кратковременно впускаемым сжатым воздухом. Воздух поступает через отверстие в центре нижней крышки и, отклоняясь зонтичным отражателем, образует кольцевую струю, распыляющую навеску порошка во взрывной камере. В качестве воспламенителя обычно используют искровой разряд от индуктора или конденсатора, определяя при этом минимальную энергию воспламенения. Для пылей, не воспламеняющихся от искры, применяют более мощные источники воспламенения.

Схема распылительного узла взрывной камеры Горного бюро США и результаты испытаний такой конструкции на металлических порошках приведены ниже.

Установка ВНИИПО для определения нижнего концентрационного предела взрываемости [214] включает взрывной

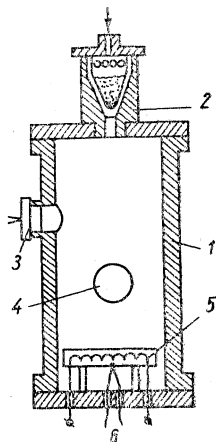


Рис. 50. Схема взрывного цилиндра ВНИИПО:

- 1 — взрывной цилиндр;
- 2 — распылительная форсунка;
- 3 — датчик давления;
- 4 — смотровое окно;
- 5 — воспламенитель;
- 6 — термopар.

цилиндр, схема которого изображена на рис. 50. Исследуемый порошок засыпают в форсунку, ввинчиваемую в верхнюю крышку взрывного цилиндра, и распыляют струей сжатого воздуха. Воспламенителем служит горизонтально расположенная пластина из огнеупорного материала с нихромовой спиралью. Температура регулируется до  $1000^{\circ}\text{C}$  и контролируется с помощью термопары, встроенной в нагреватель. О результатах испытаний взрывной камеры конструкции ВНИИПО на металлических порошках сообщается в следующем разделе.

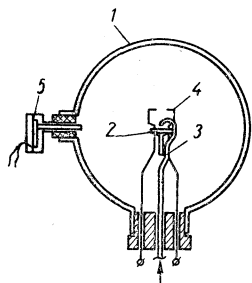


Рис. 51. Схема взрывной камеры МИСиС:

1 — прозрачная взрывная камера; 2 — чашечка для порошка; 3 — воздухоподводящая трубка; 4 — электроды воспламенителя; 5 — датчик давления.

Взрывная камера МИСиС (рис. 51) представляет собой стеклянную сферическую колбу, в центре которой размещена чашечка для порошка. Струя воздуха, распыляющая порошок, поступает через введенную в камеру трубку. Над чашечкой расположены воспламеняющие электроды. Перемещение чашечки из нижней части колбы в центр вызвано желанием создать более равномерную концентрацию пылевого облака и избежать частых разрушений сосуда при взрывах. Ссылаясь на результаты киносъемки, в МИСиС приняли, что пылевое облако занимает  $1/8$  часть объема сосуда, и концентрация пыли в этой части сферы рас-

пределена равномерно. Нижний концентрационный предел определяют отнесением массы распыленного порошка к объему пылевого облака в момент воспламенения.

Ввиду невозможности исследования влияния концентрации порошка на давление, развиваемое при взрыве в стеклянной колбе, в последние годы для этой цели в МИСиС используется методика, описанная в работах [193, 194, 222].

В МИСиС выполнены исследования воспламеняемости порошков титана, циркония, никеля, алюминия и некоторых бинарных сплавов при различном содержании составляющих.

#### УСТАНОВКИ ИПМ АН УССР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВАЕМОСТИ ПОРОШКОВ

В Институте проблем материаловедения АН УССР применяют установки для исследования взрываемости порошков с взрывными камерами различных размеров. Установки снабжены современной аппаратурой для подготовки, проведения взрыва и регистрации результатов испытаний. Они позволяют опреде-

лять давление взрыва и скорость его нарастания в зависимости от концентрации порошка, нижний и верхний концентрационные пределы, максимальное давление взрыва, скорость распространения пламени и ориентировочно — температуру и энергию воспламенения распыленных порошков. Установки снабжены устройствами для испытаний взрываемости порошков в средах с различным газовым составом и разного рода воспламенителями.

Для исследования процесса распыления порошка во взрывных камерах имеются модели взрывных цилиндров соответствующих размеров с прозрачными стенками.

Система распыления порошков в установках ИПМ АН УССР обеспечивает получение заданной достаточно равномерной концентрации частиц в облаке и качественную диспергацию порошка. Контроль концентрации осуществляется путем практически мгновенного отбора проб в камере (см. стр. 48).

### Описание установок

*Установка со взрывной камерой объемом 1200 см<sup>3</sup>.* Толстостенный корпус цилиндрической взрывной камеры (рис. 52) из нержавеющей стали снабжен фланцами, к которым с помощью откидных болтов крепятся крышки. Через одну из крышек в камеру подается сжатый воздух, ко второй прикрепляется воспламенитель. Для подогрева или охлаждения цилиндра предусмотрена водяная рубашка. Внутренний диаметр камеры 85 мм.

К стенкам корпуса приварены два патрубка, продольные оси которых совпадают. В одном из патрубков установлен датчик давления, в другой вставлено бронестекло для визуального наблюдения за процессом взрыва.

В рабочем положении камера ориентируется вертикально. Вместе с тем ей можно придавать различный угол наклона при повороте в подшипниках цапф, приваренных к кожуху. Подшипники укреплены в опорных кронштейнах. Требуемый наклон фиксируется стопорными винтами. Повороты камеры необходимы для выполнения подготовительных операций при проведении опытов.

Воспламенитель крепится к крышке камеры с помощью шпилек. Провода нагревателя и термодары в местах прохода через крышку изолируются за счет проходных изоляторов.

На шланговом вводе сжатого воздуха в камеру установлен обратный клапан, предотвращающий попадание исследуемого порошка в подводящую трубку. Камера снабжена также предохранительным клапаном. Кроме того, имеются штуцера для присоединения манометров.

Предусмотрена возможность распыления порошка распылителями различных конструкций. Герметичность фланцевых

соединений взрывного цилиндра достигается за счет прокладок из фторопласта.

Пневматическая схема установки представлена на рис. 53. Сжатый воздух, вырабатываемый компрессором О-16, нагнетается в расходные цилиндры. Схемой предусмотрена возможность последующей подачи сжатого воздуха во взрывной цилиндр из любого расходного цилиндра. Выпуск сжатого воздуха в течение заданного времени осуществляется с помощью электромагнитного клапана. Давление воздуха в цилиндрах контролируется манометрами.

Взрывная камера помещается в шкафу, смонтированном на каркасе. Узлы пневматической системы расположены в нижней части шкафа, который служит укрытием, препятствующим распространению газообразных продуктов взрыва; для их удаления к верхней части шкафа присоединен местный отсос. Для удобства эксплуатации все четыре стенки выполнены в виде дверей.

Управление производством взрыва с регистрацией давления, возникающего в цилиндре, регистрация, контроль и регулирование температуры осуществляются с помощью приборов и электрической схемы (рис. 54).

Для регистрации, контроля и регулирования температуры установлены термодатчики (ТД) в качестве первичного прибора и электронный потенциометр (ЭП) типа ПСР1-01 в качестве вторичного. Напряжение на воспламенитель подается от автотрансформатора (АТ) и контролируется вольтметром. Ток воспламенителя контролируется амперметром. Регистрация давления, возникающего при взрыве, осуществляется осциллографом (ОФ) типа Н-700. Датчиком давления служит тензодатчик  $R_4$ , являющийся одним из четырех плечей измерительного моста. Сигналы от датчика усиливаются тензометрическим усилителем

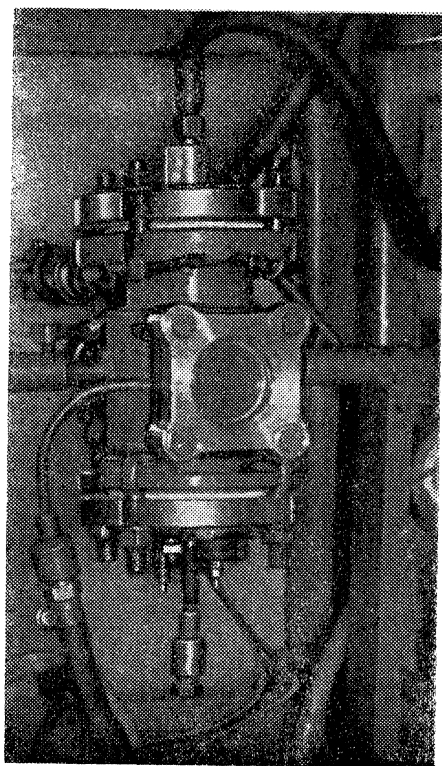


Рис. 52. Общий вид взрывной камеры ИПМ объемом 1200 см<sup>3</sup>.

Для регистрации, контроля и регулирования температуры установлены термодатчики (ТД) в качестве первичного прибора и электронный потенциометр (ЭП) типа ПСР1-01 в качестве вторичного. Напряжение на воспламенитель подается от автотрансформатора (АТ) и контролируется вольтметром. Ток воспламенителя контролируется амперметром. Регистрация давления, возникающего при взрыве, осуществляется осциллографом (ОФ) типа Н-700. Датчиком давления служит тензодатчик  $R_4$ , являющийся одним из четырех плечей измерительного моста. Сигналы от датчика усиливаются тензометрическим усилителем

(УТ) типа ТУ-4м. Управление производством взрыва — полуавтоматическое в функции времени. Необходимые выдержки времени обеспечиваются программным реле (РП) типа ВС-10-32 и реле времени (РВ) типа Е 525/1Т.

Действие электрической схемы сводится к следующему. Включают автомат АВ; при этом напряжение 220 в подается к выпрямителю осциллографа ИП, электронному стабилизатору СТ<sub>1</sub>, тензометрического усилителя УТ, стабилизатору напряжения СТ<sub>2</sub>, электронного потенциометра ЭП. Одновременно напряжение подается и к цепи программного реле РП, реле времени РВ, промежуточного реле Р и электромагнитного клапана ЭМ.

Включением выключателя ВП напряжение подается в цепь управления и питания воспламенителя РН. При температуре воспламенителя меньше заданной нормально открытый (н. о.) контакт «min» электронного потенциометра ЭП замыкается в цепи магнитного пускателя ПМ, который замыкает свой н. с. контакт во вторичной цепи автотрансформатора РНТ, тем самым включая воспламенитель РН. В зависимости от требуемой температуры воспламенителя подбирают силу протекающего через него тока за счет регулирования напряжения во вторичной цепи РНТ. Превышение заданной предельной температуры предотвращается размыканием контакта «min», обесточивающего цепь катушки пускателя ПМ, который размыкает цепь воспламенителя РН.

К проведению взрыва должна быть подготовлена также вся аппаратура, регистрирующая давление. Для этого включают все тумблеры на осциллографе ОФ, кроме кассеты, и тензометрический усилитель. Затем тумблером В включается программное реле РП, которое замыканием своего н. о. контакта РП<sub>1</sub> включает кассету осциллографа. После паузы 1 сек, необходимой для разгона кассеты, замыкается н. о. контакт РП<sub>2</sub> в цепи реле времени РВ. Реле РВ своим н. о. контактом мгновенного действия включает электромагнитный клапан ЭМ и подает напряжение батареи Б на один из шлейфов осциллографа. Тем самым на осциллограмме в виде отрезка прямой фиксируется длительность впуска сжатого воздуха в цилиндр. Потенциометр П

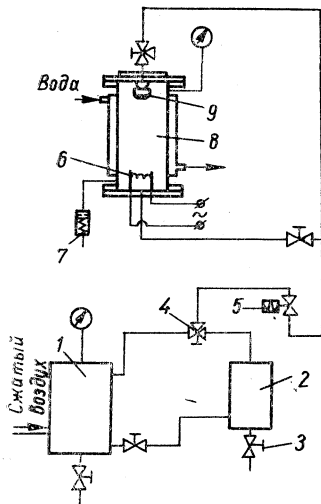


Рис. 53. Пневматическая схема:

1, 2 — расходные цилиндры объемом 6 и 2 л; 3 — вентиль; 4 — трехходовой кран; 5 — электромагнитный клапан; 6 — воспламенитель; 7 — предохранительный клапан; 8 — взрывная камера; 9 — распылитель.

служит для регулирования рабочего тока гальванометра осциллографа, т. е. угла отклонения светового луча.

Длительность распыления порошка, как и подачи напряжения батареи Б на шлейф осциллографа, определяется реле РВ, которое с установленной выдержкой времени размыкает свой нормально закрытый (н. з.) контакт в цепи реле Р.

С выдержкой времени, достаточного для регистрации давления в процессе взрыва, программное реле РП размыкает свой

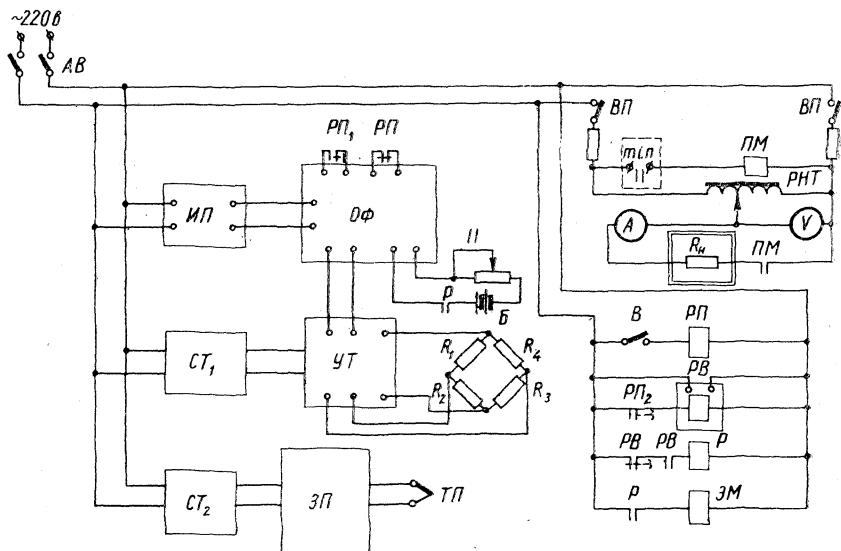


Рис. 54. Электрическая блск-схема управления проведением взрыва.

н. з. контакт в цепи мотора кассеты осциллографа, останавливая его. Обычно достаточна выдержка времени 9 сек с момента включения тумблера В. Электрические приборы контроля и управления проведением взрыва смонтированы на общем пульте (рис. 55).

Установка с взрывной камерой объемом 4000 см<sup>3</sup>. Конструкция взрывной камеры аналогична описанной выше. Внутренний диаметр цилиндра равен 110, высота — 400 мм. Установка оснащена аппаратурой для управления процессом взрыва, подготовки газовой смеси, контрольной и регистрирующей аппаратурой. Использование такой установки значительно расширяет возможности изучения характеристик взрываемости различных порошков.

Системой газоподготовки (рис. 56) предусмотрены подготовка газовой смеси с заданным содержанием составляющих, необходимая степень осушки и очистки газов. Схема газорас-

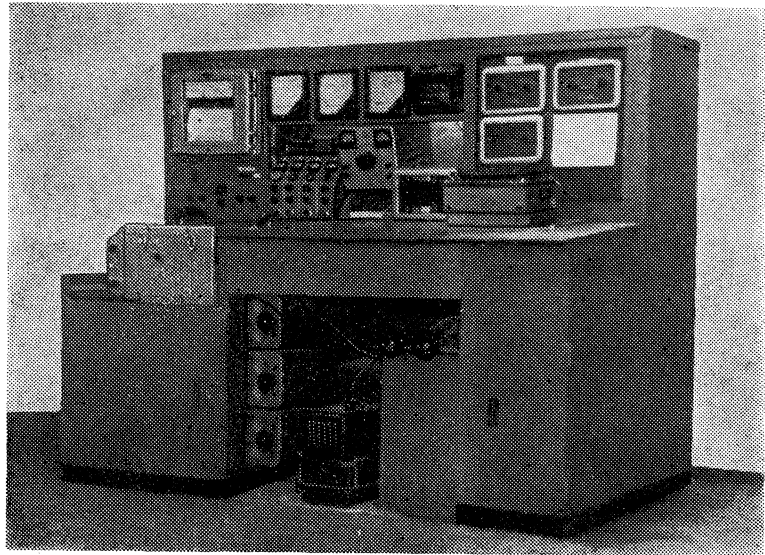


Рис. 55. Пульт контроля и управления проведением взрыва.

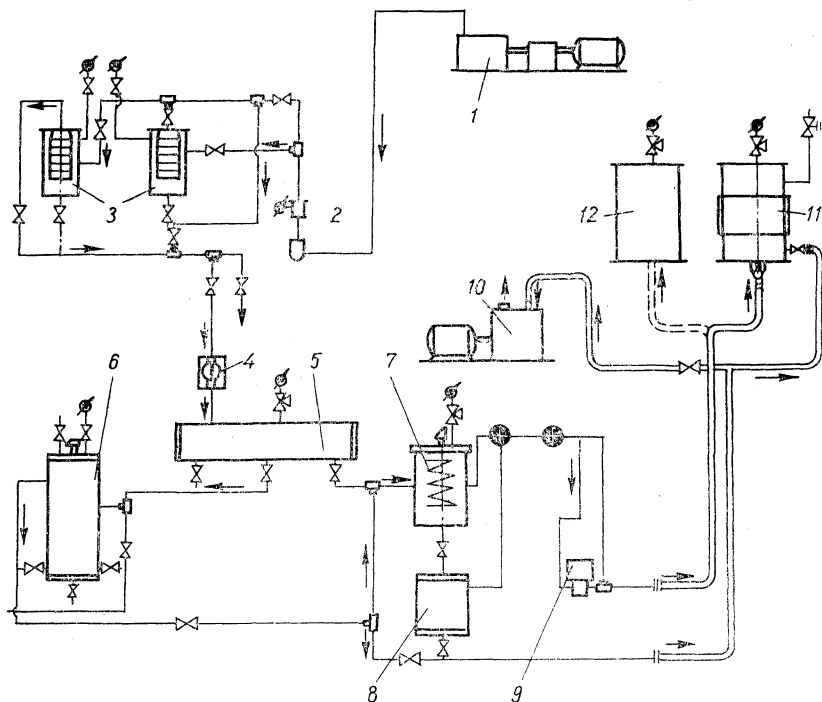


Рис. 56. Схема газоподготовки и газораспределения:

1 — компрессор; 2 — маслоотделитель; 3 — осушитель; 4 — влагомер; 5 — коллектор; 6 — смеситель; 7 — 6-литровый расходный цилиндр с подогревателем; 8 — 2-литровый расходный цилиндр; 9 — электроклапан; 10 — вакуумный насос; 11 — взрывная камера; 12 — модель взрывной камеры.



пределения дает возможность осуществлять кратковременную, с соблюдением заданного режима подачу подготовленного газа во взрывную камеру. Взрывы можно проводить при различных значениях разрежения (давления) среды во взрывной камере и начальной температуры газов и корпуса камеры.

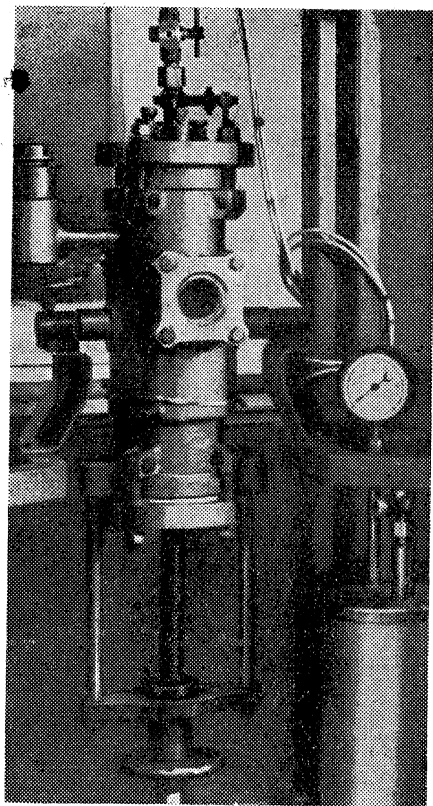


Рис. 57. Взрывная камера объемом  $4000 \text{ см}^3$ .

Конструкция взрывной камеры (рис. 57) позволяет применять различные типы воспламенителей: тепловой — в виде нагретого тела, искровой, дуговой, плавкую вставку и другие.

Быстропротекающий взрывной процесс можно изучать, применяя скоростную киносъемку (кинокамеры СКС) и высокоскоростную (установка СФР). Давление, возникающее при взрыве, регистрируется осциллографом Н-107. Оно воспринимается тензодатчиком тензометрической установки. Управление проведением взрыва — полуавтоматическое. Необходимые вы-

держки времени с минимальным интервалом  $0,1$  сек обеспечиваются программными и электронными реле времени. Электрические приборы контроля и управления смонтированы на общем пульте.

Конструкция распылительного узла, системы воспламенения и оптимальные параметры работы установки определены на основании исследований, результаты которых изложены далее.

### Выбор конструкции распылителя и режимов распыления

Поставленная задача осложняется из-за неизученности механизма распыления порошков. Наряду с этим, если для установившегося процесса накоплен определенный опыт распыления порошков сжатым газом и известно много различных конструкций пылепитателей [226], то по импульсному распылению порошков сжатым газом данных очень мало.

Как указывалось, индивидуальные свойства порошков, пока не поддающиеся количественной оценке, являются определяющими при выборе распылителей и оптимальных режимов распыления. Поскольку теоретический расчет сил сцепления между частицами ненадежен и экспериментально они не исследованы, при выборе распылителя и режимов распыления для каждого вида порошка возникает необходимость в проведении соответствующих исследований.

Методические разработки при выборе конструкции распылителей и режимов распыления, а также при определении характеристик взрываемости описаны на примере порошков восстановленного железа. Данные о химическом и дисперсном составе порошков приведены в главе II.

В число испытываемых распылителей включали распылитель (рис. 58, а), примененный в установке ВНИИПО для определения нижнего предела взрываемости [184, 214], а также распылитель тороидального типа (рис. 58, в), используемый Горным бюро США [193].

Предварительную оценку эффективности распылителя осуществляли с помощью кино съемки, чтобы избежать в случае бесперспективных распылителей трудоемких исследований по снятию полей концентраций пробоотборником. Об эффективности работы распылителя судили по характеру распространения облака (насколько равномерно оно заполняло объем модели взрывной камеры), по полноте выдувания в камеру распыляемой массы порошка, распределению осевшего порошка на днище модели и по величине осаждения порошка на стенках камеры.

Распылитель конструкции ВНИИПО (см. рис. 58, а), ввиду сосредоточенной подачи порошка, создает крайне неравномер-

ное распределение концентрации: концентрация по оси камеры в десятки раз превышает осредненную и очень быстро снижается, не успевая выровняться.

В отличие от предыдущей схемы, распылитель, названный нами наперстковым (см. рис. 58, б), помещается непосредственно во взрывной камере. Однако и при такой схеме не достигается

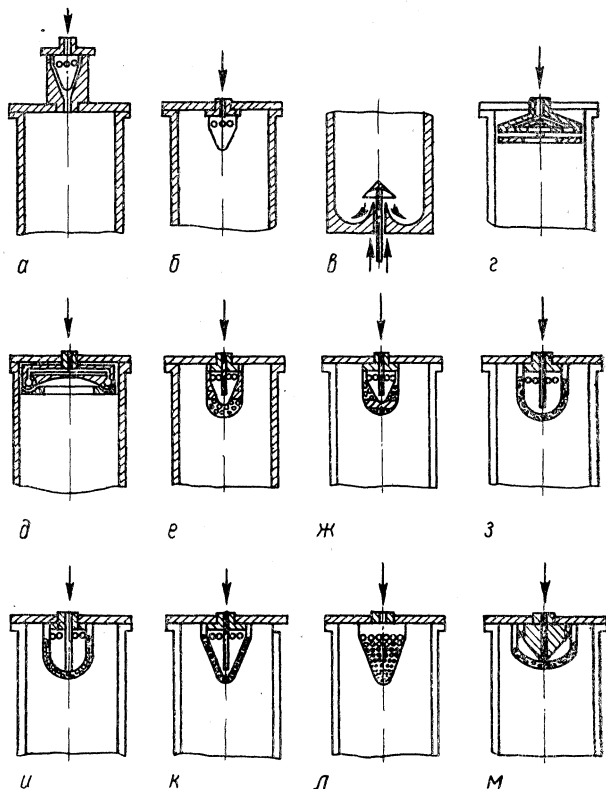


Рис. 58. Схемы распылителей:

*а* — распылитель ВНИИПО с сосредоточенной полачей аэрозвеси в камеру; *б* — наперстковый; *в* — торoidalный; *г* — щелевой; *д* — торoidalный верхний; *е, ж, з, и* — с цилиндрическими распределительными решетками; *к* — с конусной распределительной решеткой; *л* — с конусной распределительной решеткой и неравномерным распределением отверстий; *м* — с вихревой камерой и полусферической распределительной решеткой.

равномерное распределение концентрации: струями, вытекающими через отверстия распылителя, частицы отбрасываются к стенкам камеры, вследствие чего концентрация здесь значительно превышает концентрацию в середине камеры. Отмечаются значительные потери порошка за счет инерционного осаж-

дения частиц на стенках, поэтому от использования распылителя такого типа отказались.

В тороидальном распылителе (см. рис. 58, в) Горного бюро США [193] нельзя получить высокое значение градиента скорости потока, а следовательно — обеспечить эффективную дезагрегацию частиц. Не удастся также создать равномерного по высоте всей камеры облака, особенно при распылении порошков металлов с большой плотностью. Применение тороидального распылителя оправдано при распылении относительно грубодисперсных порошков, не склонных к образованию агрегатов, с невысокими плотностью вещества и концентрацией порошка в камере. Высота взрывной камеры при этом должна быть небольшой.

Более равномерное распределение концентрации по высоте камеры достигается при размещении тороидального или щелевого распылителей сверху цилиндрической взрывной камеры (см. рис. 58, г, д). Однако качество диспергирования порошков существенно не улучшается. Такие же недостатки свойственны и хорошо известному чашечному распылителю [41, 194], при котором неравномерность концентрации возрастает.

На основании представления о механизме распыления и результатов испытаний известных распылителей представляется рациональной следующая схема импульсного распыления порошков. Слой порошка в камере, которую мы назвали вихревой, взвихривается кратковременно истекающей через сопло с большой скоростью струей сжатого газа. Слой порошка переходит в газозвесь и выносится из вихревой камеры через отверстия или узкую щель с большой скоростью, разрушая агрегаты частиц за счет создания большого градиента скорости. Равномерное распределение диспергированных частиц в камере должно осуществляться с помощью распределительной решетки.

Из известных конструкций распылителей по такой схеме работает распылитель МакНИИ [217]. Однако форма и параметры распылителя не обеспечивают качественного распыления металлических порошков. Как показали испытания распылителя на очень мелком железном порошке, большая часть порошка не выдувается из вихревой камеры.

Различные конструкции распылителей (см. рис. 58, е—л) испытывали в связи с поиском наиболее выгодных параметров

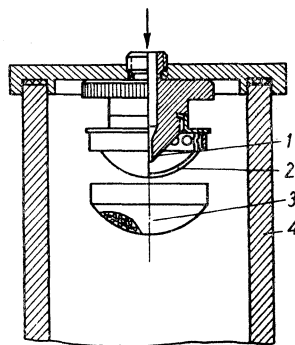


Рис. 59. Схема распылителя с вихревой камерой и распределительной решеткой:

1 — сопло; 2 — вихревая камера; 3 — распределительная решетка; 4 — взрывная камера.

и формы, отвечающих выбранной схеме процесса распыления. Распылители отличаются формой вихревой камеры и распределительной решеткой, расположением отверстий в распределительной решетке. Каждый из этих распылителей не отвечает полностью поставленным требованиям: не обеспечивается равномерность распределения частиц во взрывной камере (рис. 58, *е, ж, и*), за счет инерционного эффекта частицы осаждаются на стенках модели (рис. 58, *ж, к*), значительная часть порошка остается в вихревой камере распылителя (рис. 58, *з, и*), или на распределительной решетке (рис. 58, *е, ж*).

Опыты проводили при различных значениях давления сжатого воздуха и продолжительности импульса, изменяя их соответственно в пределах 1—3 *ати* и 0,2—0,5 *сек*. Наряду с хорошо распыляемыми порошками распыляли также плохо диспергируемый — очень мелкий железный порошок, отобранный из аспирационной системы.

На основании результатов проведенных исследований и данных о механизме распыления определили исходные условия для разрабатываемого распылителя с учетом распыления плохо диспергируемых порошков. Эти условия сводятся в основном к следующему:

«мертвый объем» вихревой камеры (объем, незаполненный порошком) должен быть минимальным;

расстояние между выходным сечением сопла и дном вихревой камеры необходимо регулировать, минимальный зазор 2—3 *мм*;

истечение газозвеси из вихревой камеры следует осуществлять через кольцевую щель шириной около 0,5 *мм* или отверстия диаметром 1—3 *мм* со скоростью около 150 *м/сек*;

отверстия вихревой камеры не должны находиться против отверстий распределительной решетки;

пространство между вихревой камерой и распределительной решеткой следует рассматривать как внутренний объем распределителя с попутной раздачей газозвеси от периферии к центру; равномерность раздачи может быть обеспечена за счет сужения кольцевого зазора между вихревой камерой и распределительной решеткой в направлении от периферии к центру; при этом следует предусматривать возможность регулирования зазора.

Распылитель, схема которого представлена на рис. 59, разработан с учетом перечисленных условий. Оптимальные условия распыления порошка из губчатого железа во взрывной камере объемом 1200 *см<sup>3</sup>* достигаются при продолжительности импульса 0,4 *сек* и избыточном давлении в расходном цилиндре 2 *ати*. На рис. 60 (см. вклейку между стр. 48 и 49) отражен характер процесса распыления.

## Исследование распределения концентрации в модели взрывной камеры

Выбрав наиболее удачную конструкцию распылителя на основании анализа процессов распыления порошков по данным киносъемки, исследовали распределение концентрации порошка в соответствующих замерных точках (рис. 61 и табл. 7) модели взрывной камеры объемом  $1200 \text{ см}^3$  и динамику изменения концентрации во времени при оптимальном режиме распыления.

Отбор проб в камере осуществляли с помощью пробоотборника мгновенного действия (см. рис. 33), разработанного специально для данных целей.

При оценке повторяемости определений, получаемых с использованием пробоотборника, необходимо учитывать особенность пылевого опробования, заключающуюся в том, что измеряемая величина — концентрация пыли — не является постоянным числом, а непрерывно изменяется. Это особенно проявляется при нестационарном процессе, который характерен для нашего случая — создания пылевого облака импульсным распылением сжатым газом исследуемого порошка. Поэтому требуется иная оценка результатов измерений по сравнению с тем, когда измеряемая величина неизменна, а ошибка рассеяния обусловлена только используемым методом измерения.

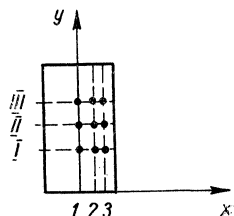


Рис. 61. Расположение замерных точек в модели взрывной камеры:

1, 2, 3 — вертикальные замерные сечения; I, II, III — горизонтальные замерные сечения.

Таблица 7

Горизонтальные сечения	Вертикальные оси					
	1		2		3	
	Координаты точек отбора проб, мм					
	x	y	x	y	x	y
I	0	74	15	74	28	74
II	0	103	15	103	28	103
III	0	130	15	130	28	130

Рассеяние измеряемой концентрации можно характеризовать коэффициентом вариационного рассеяния  $\omega_0$ , не связанного с точностью измерения и точностью прибора, а определяемого исключительно природой процесса [226]. Измерительный прибор также дает ошибку рассеяния ( $\pm \omega_n$ ).

Суммарное рассеяние включает ошибку рассеяния  $\omega_n$  и вариационное рассеяние  $\omega_0$ . Если допустить, что вариация и ошиб-

ка не зависят друг от друга, суммарное рассеяние (суммарный коэффициент вариации)  $\omega = \pm \sqrt{\omega_0^2 + \omega_n^2}$ , а следовательно,  $\omega_0 = \pm \sqrt{\omega^2 - \omega_n^2}$ .

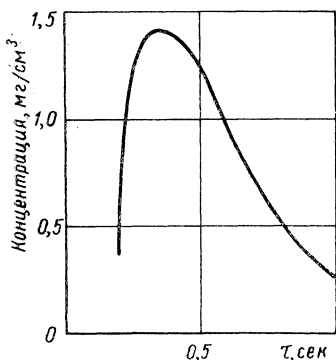


Рис. 62. Изменение концентрации частиц во времени.

При пылевых измерениях даже в случае установившегося процесса разница между суммарным и вариационным рассеянием обычно незначительна. Это тем более справедливо для быстротекающих неустановившихся процессов.

Из формулы суммарного рассеяния следует вывод, очень существенный для оценки опытного ряда. Поскольку вариационное рассеяние по сравнению с рассеянием ошибок велико, то нет надобности стремиться к получению рассеяния ошибок излишне малым. Нельзя, естественно, пренебрегать достоверностью

измерительных приборов. Необходимо и достаточно соблюдать условие, чтобы  $\omega_n$  было значительно ниже  $\omega_0$ .

Можно с уверенностью предположить, что концентрация твердой фазы во взрывной камере будет изменяться не меньше, чем запыленность при установившемся процессе  $\pm (20-25\%)$  [226]. Имеется в виду, безусловно, ряд измерений концентрации в определенное время и в заданной точке пылевого облака, создаваемого во взрывной камере. Что касается рассеяния ошибок  $\omega_n$ , то благодаря простоте устройства пробоотборника, оно не должно превышать  $\omega_n$  обычной методики определения массовой концентрации пробы при фильтрации воздуха через фильтр ( $\pm 5\%$ ). Тогда  $\omega_n \approx 0,25 \omega_0$ , а  $\omega_n^2 \approx 0,06 \omega_0^2$  или  $6\%$  от  $\omega_0^2$ ; отклонение между  $\omega$  и  $\omega_0$  составит только  $\pm 3\%$ .

Для определения необходимого числа проб при дальнейших исследованиях распределения концентрации пыли в модели взрывной камеры провели 53 опыта при одинаковых условиях распыления порошка и пробоотбора.

Статистическая обработка результатов показала следующее. Среднеарифметическое значение относительной концентрации  $\bar{N} = 0,35$ ; сумма квадратов отклонений  $\sum (N_i - \bar{N})^2 = 0,8421$ ; среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 0,126$ ; коэффициент вариации  $\omega = 36\%$ .

Задавшись достоверностью  $85\%$  (нормированное отклонение для закона нормального распределения ошибок равно 1,65) и величиной допускаемой ошибки  $30\%$ , получим необходимое число проб — 3,9. Минимальное число проб для последующих опытов принимаем равным 4.

Как видим, из графика изменения концентрации частиц порошка во времени (рис. 62) в точке с координатами  $x=0$ ,  $y=74$  мм наблюдается быстрое повышение концентрации с достижением максимума через 0,3 сек, считая от начала впрыска. В течение последующих 0,2 сек максимальный уровень почти сохраняется. Затем концентрация быстро снижается.

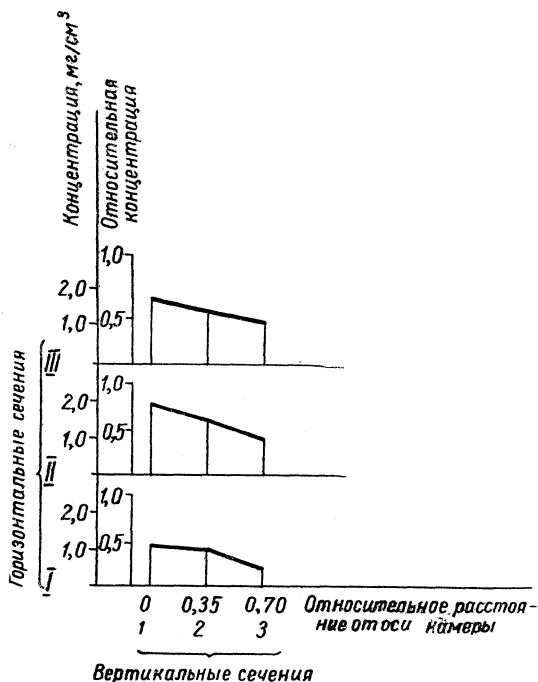


Рис. 63. Распределение концентрации частиц в объеме модели взрывной камеры.

В момент достижения максимальной концентрации облако аэровзвеси распределено довольно равномерно (рис. 63). Почти полностью выравнивается концентрация в средней части камеры в сечении с  $y=74$  мм. Следовательно, эта зона наиболее благоприятна для размещения воспламенителя.

Характерно, что уровень концентрации частиц, за исключением пристеночной зоны, изменяется от 0,4 до 0,8 условной концентрации, полученной отнесением всей распыленной массы порошка к объему камеры. Объяснить данный факт можно тем, что облако аэровзвеси достигает дна камеры уже через 0,2 сек (см. рис. 60); при этом некоторая доля частиц оседает.



При определении н. к. п. за искомую концентрацию, очевидно, следует принимать максимальную фактическую, создаваемую в зоне расположения воспламенителя непрерывного действия в процессе распыления порошка (через 0,3—0,4 сек от начала распыления) (см. рис. 62).

Действительно, если в серии опытов с постепенным повышением концентрации диспергированного порошка наступит момент воспламенения, это будет означать, что максимальная концентрация в данном опыте достигла минимального уровня, необходимого для протекания процесса. В ином случае воспламенение

произошло бы в предыдущем опыте (см. рис. 62). (Имеется в виду величина максимальной концентрации в зоне воспламенителя.) Процесс при этом не затухает, так как в остальной части камеры, над воспламенителем, концентрация несколько выше (см. рис. 63).

При определении н. к. п. удобно пользоваться графиком изменения относительной концентрации (рис. 64). За единицу принята концентрация, получаемая делением массы распыленного порошка на объем камеры.

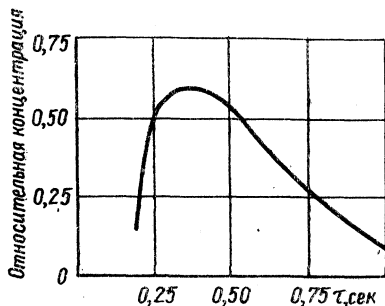


Рис. 64. Изменение относительной концентрации во времени.

По-другому следует подходить к определению концентрации частиц при исследовании зависимости между концентрацией и возникающими во взрывной камере максимальными давлениями. Поскольку скорость распространения пламени соизмерима со скоростью движения пылевого облака, то по мере продвижения фронта пламени навстречу распространяющемуся облаку в процесс будет вовлекаться вся масса распыленного во взрывной камере порошка. Возникающие давления являются, по существу, результатом суммарных тепловыделений, поэтому в данном случае правильнее определять концентрацию как отношение всей массы распыленного в камере порошка к объему взрывной камеры.

## Выбор воспламенителя

В настоящее время существует единственная инструкция по определению нижнего концентрационного предела взрываемости (воспламеняемости) порошков — временная инструкция ВНИИПО [214], предусматривающая применение теплового воспламенителя в виде нагретой пластины (см. рис. 50). В связи с этим такой воспламенитель вначале применили и в установках

ИПМ АН УССР. В соответствии с инструкцией ВНИИПО нагреваемая пластина была расположена горизонтально у дна цилиндрической взрывной камеры, занимая большую часть поперечного сечения камеры. Нагрев до температуры  $1000^{\circ}\text{C}$  осуществляли с помощью нихромовой спирали и контролировали термопарой в сочетании с электронным потенциометром.

Испытания показали, что при распылении тяжелых металлических порошков (например, железных) частицы очень быстро достигают горизонтальной поверхности воспламенителя, препят-

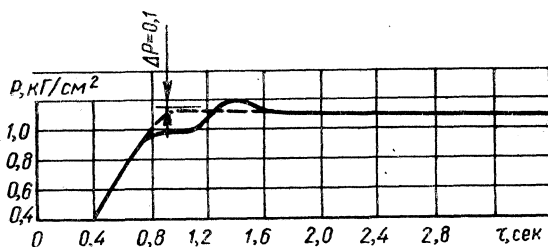


Рис. 65. Оциллограмма давления при воспламенении порошка ПЖМ нагретой горизонтальной пластиной (масса распыленного порошка 5 г).

ствующего их дальнейшему движению, и оседают на нем, не успевая воспламениться в состоянии аэрозвеси. В дальнейшем происходит воспламенение слоя осевшего порошка. Следовательно, теплового взрыва всей массы распыленного во взрывной камере порошка не происходит, чем объясняются чрезмерно низкие значения приращения давления взрыва (рис. 65) при воспламенении железных порошков по методике ВНИИПО. Нагретое тело — мощный источник тепла, действующий в небольшой камере. При этом условия воспламенения существенно отличаются от натуральных. Производительность установки низка вследствие медленности процесса нагрева и охлаждения воспламенителя, а также его малого срока службы.

Прежде чем переходить к обоснованию выбора источника воспламенения, остановимся на некоторых общих положениях.

При производстве и применении взрывоопасных порошков причиной воспламенения и взрыва могут явиться самые разнообразные источники. Имитировать все возможные источники воспламенения при исследовании характеристик взрываемости в лабораторных условиях практически невозможно. Исходя из этого, а также принимая во внимание недостатки установки ВНИИПО, при выборе воспламенителя руководствовались следующим.

Источник воспламенения должен часто встречаться при производстве и применении исследуемых порошков, быть достаточно мощным и обеспечивать стабильный эффект воспламенения.

Вместе с тем нарушение картины течения газодисперсной системы за счет размещения воспламенителя в камере должно быть, по возможности, минимальным. Воспламенитель должен обладать простой конструкцией, быть удобным и надежным в работе.

Одним из известных воспламенителей, отвечающим таким требованиям, является тепловой воспламенитель в виде нагреваемой током спирали [229]. Испытание такого воспламенителя с параметрами, указанными в работе [229], не дали устойчивого воспламенения.

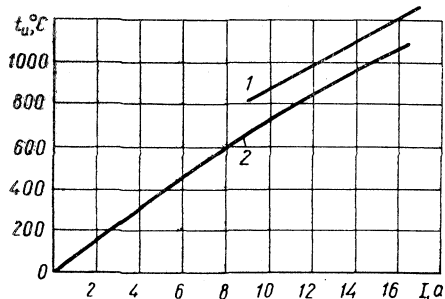


Рис. 66. Тарировочный график спирального воспламенителя:

1 — поверхностная температура; 2 — температура внутри спирали.

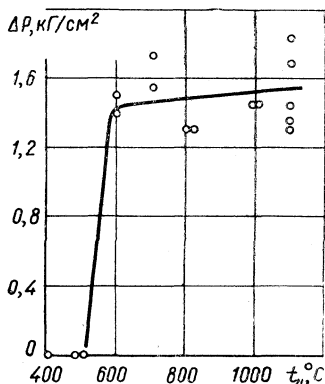


Рис. 67. Зависимость развиваемого при взрыве давления от температуры воспламенителя.

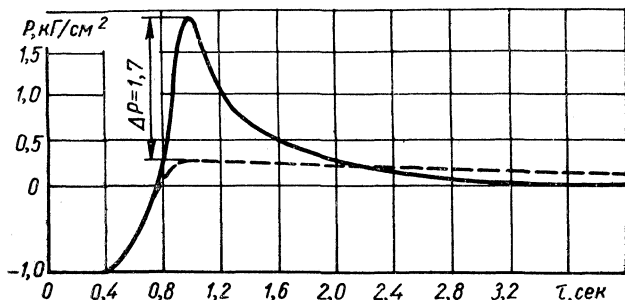


Рис. 68. Осциллограмма давления при воспламенении порошка ПЖМ нагретой спиралью.

Устойчивого воспламенения распыленного порошка железа достигли при следующих параметрах спирального воспламенителя: диаметр проволоки 0,5 мм; длина проволоки 340 мм; внутренний диаметр спирали 8 мм; количество витков 11; длина спирали 18 мм.

Спираль имеет большие зазоры между витками в центре, что создает более равномерную температуру по длине. Тариро-

вочная кривая спирали приведена на рис. 66. Поверхностную температуру воспламенителя периодически контролировали оптическим пирометром ОППИР-17, а температуру внутри спирали определяли при тарировке с помощью термопары и ПСР.

На рис. 67 показана зависимость давления от температуры воспламенителя, при взрыве железного порошка Сулинского завода крупностью менее 50 мк. Давление, развиваемое при взрыве в диапазоне температур 600—1100° С, практически не зависит от температуры воспламенителя. В связи с этим эксперименты проводили при температуре воспламенителя 1000—1100° С (ток 15—16,5 а).

Результаты опыта со спиральным воспламенителем представлены на рис. 68. В данном случае распыляли такую же массу порошка, как и в опыте с воспламенителем ВНИИПО (см. рис. 65). Спиральный воспламенитель с выбранными нами параметрами обладает достаточной мощностью, обеспечивает стабильное продуцирование взрывов и может быть использован при исследовании взрываемости металлических порошков. Если при исследовании взрываемости других порошков спиральный воспламенитель не обеспечит воспламенения, то следует применить иные типы воспламенителей.

#### Исследование влияния начального давления газа на параметры взрыва

При распылении порошка импульсной подачей сжатого газа его давление во взрывной камере  $P_n$  перед моментом воспламенения обычно выше атмосферного, в зависимости от принятой методики, — от десятых долей килограмма на 1 см<sup>2</sup> до нескольких атмосфер. Величина  $P_n$ , естественно, должна отражаться на измеряемом при взрыве перепаде давления, однако большинство исследователей не учитывает этого.

В промышленных условиях взрывоопасные газовзвеси могут образовываться в технологическом оборудовании, находящемся под давлением или разрежением. Поэтому  $P_n$  является важным параметром, от которого зависят развиваемые при взрыве давления.

На рис. 69 приведены данные работы [87]. При концентрации угольной пыли 1750 г/м<sup>3</sup> величина взрывного коэффициента  $k_B$  (пропорциональная взрывному давлению) увеличивается прямо

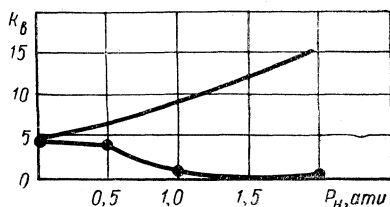


Рис. 69. Зависимость взрывного коэффициента ( $k_B$ ) от начального давления ( $P_n$ ) воздуха в камере.

пропорционально начальному давлению в камере. Однако при концентрации  $750 \text{ г/м}^3$  и давлении выше атмосферного  $k_B$  начинает уменьшаться, и при  $P_H=2 \text{ ати}$   $k_B=0$ . К сожалению, авторы

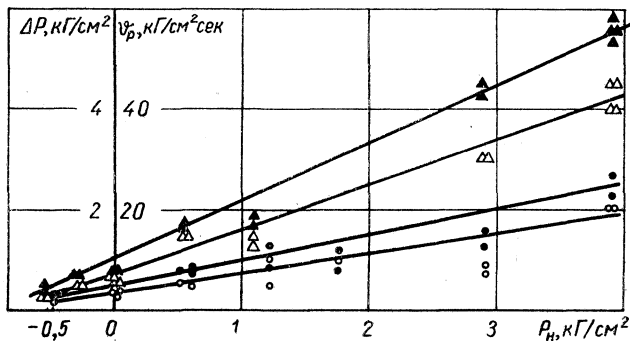


Рис. 70. Зависимость приращения давления  $\Delta P$  и скорости повышения давления  $v_p$  от начального давления в камере при взрыве железных порошков (● —  $\Delta P$ , ○ —  $v_p$ ,  $N=0,85 \text{ г/л}$ ; ▲ —  $\Delta P$ , △ —  $v_p$ ,  $N=5,5 \text{ г/л}$ ).

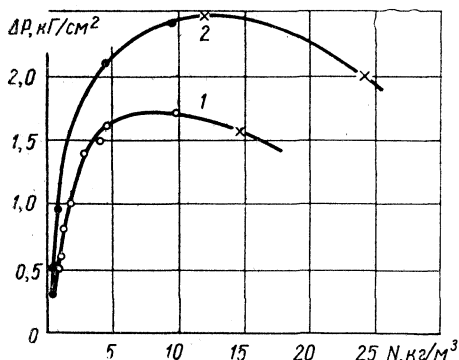


Рис. 71. Зависимость приращения давления при взрыве от концентрации фракций порошка ПЖЗМ мельче  $50 \text{ мк}$  при  $P_H=0,2$  (1) и  $0,7 \text{ кг/см}^2$  (2).

× — значения концентрации, приведенные к нормальным условиям.

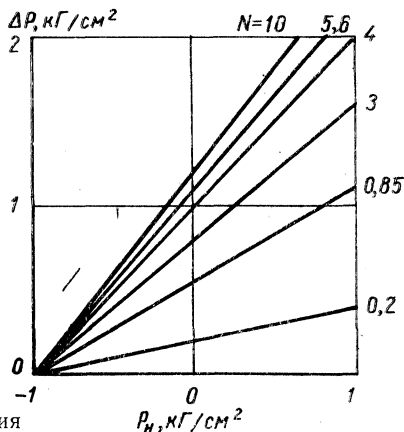


Рис. 72. Зависимость  $\Delta P$  от  $P_H$  для различных значений  $N$ .

не описывают методик проведения опытов и не анализируют полученных результатов.

Наши опыты сводились к следующему. С помощью вакуум-насоса и компрессора во взрывной камере предварительно создавали разрежение до  $1 \text{ ати}$  или давление до  $3 \text{ ати}$  и при пере-

паде давления 2 *ати* между взрывной камерой и расходным цилиндром (для сохранения неизменности условий распыления порошка) начальное давление в камере перед взрывом изменяли от  $-0,5$  до  $+3,9$  *ати*. Во всех опытах распыляли порошок ПЖМ крупностью менее 50 *мк*. Результаты опытов представлены на рис. 70.

Как видим, существует прямолинейная зависимость превышения давления и скорости его нарастания при взрыве от начального давления в камере:

$$\Delta P = k_p (P_H + 1), \quad (III.1)$$

$$v_p = k_v (P_H + 1). \quad (III.2)$$

Величина коэффициентов  $k_p$  и  $k_v$  не зависит от начального давления в камере взрыва, а зависит только от концентрации распыленного порошка.

Для определения величины коэффициента  $k_p$  на основании данных экспериментов построены зависимости  $\Delta P$  от концентрации при  $P_H = 0,2$  и  $P_H = 0,7$   $\text{кг/см}^2$  (рис. 71), а также  $\Delta P = f(P_H)$  для различных концентраций  $N$  в  $\text{г/л}$  (рис. 72).

По значениям  $\Delta P$  при  $P_H = 0$ , согласно рис. 72 построен график зависимости  $\Delta P_0$  от  $N$  (рис. 73). Коэффициент  $k_p$  численно равен  $\Delta P_0$ .

Из формулы (III.1) с учетом графика (рис. 73) можно определять значения  $\Delta P$  при любом начальном давлении и концентрации порошка ПЖМ крупностью менее 50 *мк*, т. е. наиболее взрывоопасного из железных порошков, получаемых методом комбинированного восстановления твердым восстановителем и конвертированным природным газом.

Ввиду того что зависимость  $\Delta P$  и  $v_p$  от начального давления, приведенная на рис. 70, построена по средним точкам, а максимальные значения могут превышать средние на 10—20%, при определении максимальных значений  $\Delta P$  и  $v_p$  по формулам (III.1) и (III.2) полученные величины следует увеличивать на 20%.

Результаты исследований зависимости параметров взрыва от начального давления в камере свидетельствуют о том, что изменение количества кислорода в единице объема камеры (за счет различных величин  $P_H$ ) практически не отражается на коли-

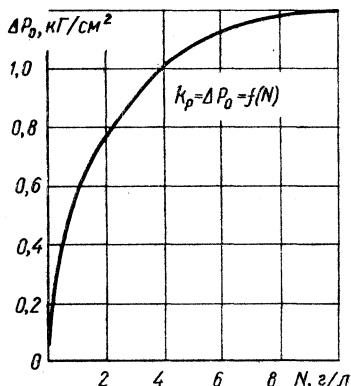


Рис. 73. Зависимость коэффициента пропорциональности от концентрации дисперсной фазы.

честве выделяемого при взрыве тепла и соответственно — на максимальной температуре, так как давление прямо пропорционально  $P_n$ , т. е. проявляется закон Шарля при  $T = \text{const}$ .

## ДАВЛЕНИЕ, РАЗВИВАЕМОЕ ПРИ ВЗРЫВЕ

Исследования характеристик взрываемости железных порошков проводили во взрывной камере с параметрами отдельных элементов и режимов работы установки, выбранными во время предварительных опытов (см. предыдущий параграф). Во всех опытах использовали распылитель с распределительной решеткой.

Воспламенение распыленного порошка осуществлялось нагретой до  $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$  нихромовой спиралью. В целях упрощения методики эксперимента опыты проводили без вакуумирования взрывной камеры (при нормальном атмосферном давлении перед распылением), при начальном давлении воздуха в расходном цилиндре  $2 \text{ атм}$  и давлении в камере, устанавливаемом к моменту окончания импульса подачи воздуха без порошка —  $P_n \approx 0,5 \text{ атм}$ . Продолжительность поступления в камеру сжатого воздуха —  $0,4 \text{ сек}$ .

При распылении порошка часть его остается в распылителе. Оставшийся в распылителе после взрыва порошок взвешивается и определяется масса фактически распыленного порошка.

В предыдущем разделе дано обоснование расчетов концентрации взвешенных в газе частиц при определении н. к. п. и в случае исследования зависимости между концентрацией и возникающими во взрывной камере максимальными давлениями. В первом случае за искомую концентрацию следует принимать максимальную фактическую, создаваемую в зоне расположения воспламенителя (около  $0,6$  условной концентрации для железных порошков, получаемой отнесением всей распыленной во взрывной камере массы порошка к объему камеры). Во втором — концентрация определяется как отношение всей массы распыленного в камере порошка к объему взрывной камеры.

В области концентраций, приближающихся к в. к. п. \*, когда начинает сказываться недостаток кислорода в газодисперсной системе для полного сгорания исходного вещества частиц, результаты определений концентрации частиц необходимо приводить к нормальным условиям, т. е. к плотности воздуха при барометрическом давлении  $760 \text{ мм рт. ст.}$  и температуре  $20^\circ\text{C}$ .

---

\* Верхний концентрационный предел взрываемости аэрозвесей (в. к. п.) соответствует максимальной концентрации, выше которой самостоятельное распространение горения в пылевом облаке невозможно.

Исследование влияния концентрации порошка на давление, развиваемое при взрыве, и на скорость его нарастания начинали серией взрывов, распыляя пробы порошка: 0,3; 0,5; 1,0; 5,0 и 10 г. Минимальную массу пробы принимали исходя из условия обеспечения концентрации в области предполагаемого уровня н. к. п. После обработки осциллограмм давлений проводили вторую серию взры-

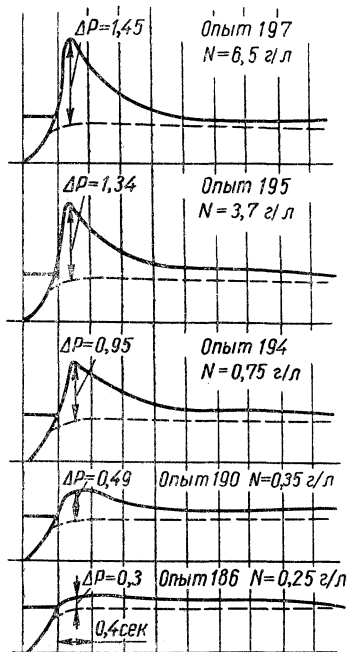


Рис. 74. Осциллограммы давлений взрыва ( $\text{кг/см}^2$ ) фракций мельче 50 мк порошка ПЖЗМ.

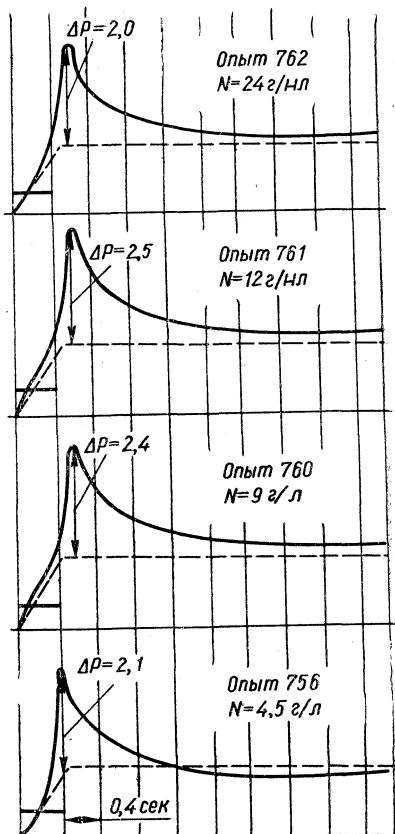


Рис. 75. Осциллограммы давлений взрывов ( $\text{кг/см}^2$ ) фракций мельче 50 мк порошка ПЖЗМ в области высоких концентраций.

вов (около 20) в области н. к. п. Минимальную массу распыляемого порошка принимали из расчета создания концентрации заведомо ниже н. к. п., а каждое последующее значение концентрации стлчалось от предыдущего на 10%. Затем была проведена серия опытов для подтверждения н. к. п. Общее количество опытов при исследовании зависимости развиваемого давления от концентрации частиц для большинства взрывающихся порошков — 60—100, а для порошка ПЖМ крупностью менее



50 мк — 100—150. Минимальное число опытов определяли, исходя из требований математической статистики.

Сопоставляя осциллограммы давлений взрывов железного порошка ПЖМ крупностью менее 50 мк при различной концентрации (опыты № 186, 190, 194, 195, 197), видим (рис. 74), что с увеличением концентрации максимальное давление и скорость нарастания давления увеличиваются. Это происходит примерно до концентрации 5 г/л. Дальнейшее повышение концен-

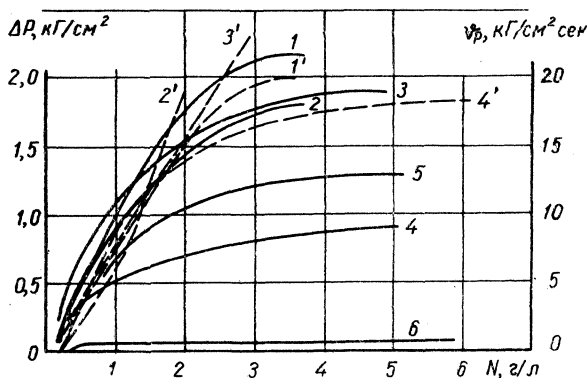


Рис. 76. Зависимость  $\Delta P$  и  $v_p$  от  $N$  для железных порошков Сулинского завода:

1, 1' — аспирационная пыль с размерами частиц мельче 50 мк; 2, 2' — аспирационная пыль; 3, 3' — ПЖЗМ мельче 50 мк; 4, 4' — ПЖЗМ; 5 — ПЖЗС мельче 50 мк; 6 — ПЖЗС; 1-6 —  $\Delta P$ ; 1'-4' —  $v_p$ .

трации приводит к незначительному нарастанию давления, а начиная с концентрации около 14 г/л давление падает (см. рис. 71). Анализ осциллограмм давлений (рис. 75) взрывов железного порошка при концентрации около 4,5 г/л; 9 г/л; 12 г/л; 24 г/л (опыты 756, 760—762) показывает, что максимальное давление наблюдается в диапазоне концентраций 10—14 г/л.

При дальнейшем увеличении концентрации давление снижается. Это свидетельствует о том, что количество кислорода при данной концентрации оказывается недостаточным для полного окисления всего порошка, а также о повышении доли тепла, расходуемого на подогрев увеличенной массы распыленных частиц. При концентрации порошка более 5 г/л начало воспламенения  $\tau_B$  и момент достижения максимального давления  $\tau_M$  задерживаются. Если при концентрации 4,5 г/л  $\tau_B$  и  $\tau_M$  соответственно равны 0,2 и 0,4 сек, то при концентрации 24 г/л  $\tau_B=0,4$  сек, а  $\tau_M=0,6$  сек. Это означает, что тепловой взрыв происходит только тогда, когда концентрация снижается до определенного

уровня, ниже области в. к. п. для данного вида порошка (ПЖМ) с частицами мельче 50 мк.

Из-за трудностей, связанных с созданием очень высокой концентрации газозвеси, опыты на других порошках проводили при концентрации меньше 10 г/л.

На рис. 76 и 77 приведены зависимости максимального давления при взрыве и скорости его нарастания от концентрации для порошков Сулинского и Броварского заводов. Во всех случаях графики построены по экспериментальным точкам, характеризующимся максимальными значениями превышения давления, для увеличения надежности используются данные.

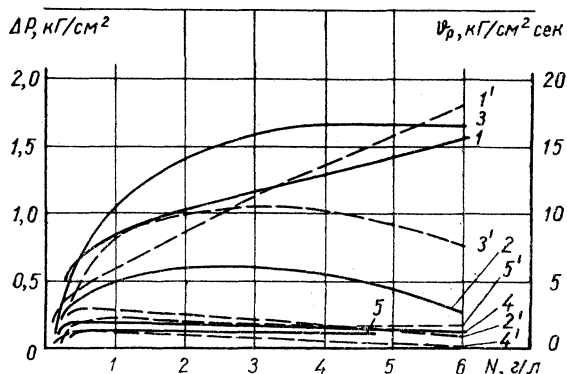


Рис. 77. Зависимость  $\Delta P$  и  $v_p$  от  $N$  для железных порошков Броварского завода:

1, 1' — ПЖ2М мельче 50 мк; 2, 2' — ПЖ2М; 3, 3' — ПЖ2С мельче 50 мк; 4, 4' — ПЖ2С; 5, 5' — аспирационная пыль; 1-5 —  $\Delta P$ ; 1'-5' —  $v_p$

Анализ результатов показывает, что максимальное давление, возникающее при взрыве порошков одинаковой концентрации, выше в опытах с мелкими порошками и пылью.

Наиболее активны фракции порошка ПЖМ с размерами частиц меньше 50 мк и пыль из аспирационной системы Сулинского завода. Менее активны фракции мельче 50 мк порошка ПЖС и порошок ПЖМ. Воспламенение среднего по крупности порошка Сулинского завода во всем диапазоне концентрации сопровождалось повышением давления не более чем на  $0,09 \text{ кг/см}^2$ . Порошок практически не взрывоспасен. Железные порошки Броварского завода в целом менее активны по сравнению с сулинскими.

Низкая активность аспирационной пыли Броварского завода, характеризующаяся максимальным превышением давления  $0,15 \text{ кг/см}^2$ , обусловлена высокой степенью окисленности железа.

Алюминиевые порошки ПА, ПП-4, ПАК-4, магниевый порошок и порошок алюминиево-магниевого сплава ПАМ-4 исследовали на установке со взрывной камерой объемом  $4000 \text{ см}^3$ , применив распылитель с плоской распределительной решеткой, занимающей поперечное сечение камеры. При этом установленная экспериментально относительная концентрация в месте расположения воспламенителя через  $0,3\text{—}0,4 \text{ сек}$  после начала распыления была равна единице.

Оптимальные значения начального давления воздуха в расходном цилиндре и длительность импульса распыления составили соответственно  $2 \text{ кг/см}^2$  и  $0,3 \text{ сек}$ .

Удельная поверхность ( $\text{см}^2/\text{г}$ ) и средние расчетные диаметры ( $\text{мк}$ ) частиц порошков соответственно равны: ПА — 1440 и 15,4; ПП-4 — 2930 и 8; ПАК-4 — 24700 и 0,9; Mg — 450 и 78,5; ПАМ — 4500 и 6,2.

Максимальные давления взрыва алюминиевых и магниевых порошков наблюдали в области концентрации  $1\text{—}2 \text{ кг/м}^3$ . При уменьшении размеров частиц концентрация порошка, при которой наблюдается максимальное давление, снижается. Если для крупных алюминиевых порошков ПА и ПП максимальное давление соответствует концентрации  $2\text{—}2,5 \text{ кг/м}^3$ , то для более мелкого порошка ПАК-4 такая концентрация равна  $0,8 \text{ кг/м}^3$ .

Максимальные давления взрыва и скорости нарастания давления у исследованных порошков равны соответственно (в  $\text{кг/см}^2$  и  $\text{кг/см}^2\text{сек}$ ): ПА-4 — 6,5 и 200; ПП-4 — 6,3 и 210; ПАК-4 — 8 и 210; Mg — 6,6 и 125; ПАМ — 5,5 и 215.

Для всех взрывающихся порошков давление повышается с увеличением содержания твердой фазы в воздухе от н. к. п. до концентрации, которая в несколько раз превышает концентрацию, соответствующую стехиометрическому соотношению компонентов. При более высокой концентрации давление падает. Максимальная величина давления при взрывах в лабораторных условиях не превышает  $10 \text{ ати}$  для сильно взрывчатых порошков (например, алюминия), однако при взрыве в каналах значительной протяженности давление может превысить эту величину и тепловой взрыв может перейти в детонацию.

По данным А. А. Скочинского, при экспериментальном взрыве угольной пыли в штольне зарегистрировано давление больше  $30 \text{ ати}$  на расстоянии  $200 \text{ м}$  от очага взрыва [230].

Давления в каналах могут даже превышать указанную величину, ввиду наличия градиента скоростей в турбулентном потоке, значительного ускорения сгорания массы пыли и последующей детонации газодисперсной системы вследствие воспламенения смеси по всей длине каналов, вызванного ударной волной.

Известны попытки создания расчетного метода определения н. к. п.

Джеккель [244] предложил теоретическую формулу для определения н. к. п. взрываемости аэровзвеси, исходя из предположения о наличии в определенном объеме плоского иницирующего источника и распространении пламени от воспламеняющихся у инициатора частиц к соседним слоям, в которых концентрация такова, что выделяющегося при сгорании тепла еще достаточно для доведения соседних частиц до температуры воспламенения и для возмещения потерь тепла в окружающую среду:

$$\text{н. к. п.} = \frac{(t_{\text{в}} - t_0) \rho c_1}{q - (t_{\text{в}} - t_0) c_2}, \quad \text{г/см}^3, \quad (\text{III.3})$$

где  $q$  — теплота сгорания пыли,  $\text{кал/г}$ ;  $t_{\text{в}}$  — температура воспламенения пыли,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_0$  — начальная температура облака,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$  — плотность воздуха (0,00125),  $\text{г/см}^3$ ;  $c_1$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме (0,17),  $\text{кал/г} \cdot \text{град}$ ;  $c_2$  — удельная теплоемкость пыли,  $\text{кал/г} \cdot \text{град}$ .

При выводе формулы упрощен механизм теплопередачи. Расчеты н. к. п. по формуле (III.3) дают заниженные результаты. Джеккель в своей работе предполагает, что при точечном источнике воспламенения н. к. п. больше величины, рассчитанной по формуле (III.3).

Экспериментальные данные по н. к. п. весьма разноречивы, поскольку определения проводили по различным методикам и при этом не учитывали таких важных характеристик порошков, как дисперсный состав, степень окисленности и др.

О разноречивости результатов можно судить по данным для алюминиевых порошков:

Крупность частиц, $\mu\text{м}$	Н. к. п., $\text{г/м}^3$	Литература
0,14—0,28	40—50	[218]
—	420	[206]
< 74	7	[205]
< 62	32	[207]
0,3—0,6	25—40	[213]
149	35—40	[182]
—	58	[34]
< 44	45	[86]
15	40	} [209]
28	180	
45	400	
< 50	35	
		[208]

Следует отметить, что в опубликованной литературе отсутствуют четкие критерии для оценки н. к. п. Во временной инструкции [214] ВНИИПО рекомендует судить о достижении н. к. п.

по крутизне кривой нарастания давления, не давая, однако, критерия оценки этой характеристики. В других работах в качестве н. к. п. принимают концентрацию, при которой избыточное давление равно 0,15 *ати*. Наконец, за н. к. п. принимается концентрация, при которой пламя от источника воспламенения распространяется по всему объему [218].

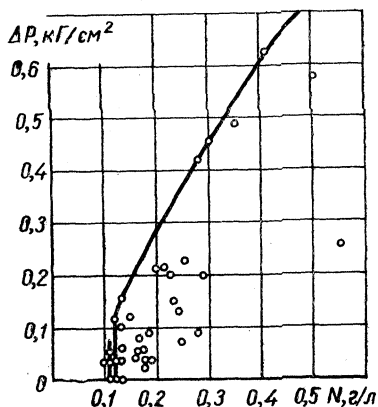


Рис. 78. Графическая зависимость  $\Delta P = f(N)$  в области н.к.п. для фракций мельче 50 мк сулинского порошка ПЖЗМ.

Чтобы выбрать критерий для определения н. к. п., рассмотрим проявление процесса воспламенения газозвеси частиц по внешней картине протекания процесса и осциллограммам давления.

Зависимость приращения давления от концентрации в этой области характеризуется значительным рассеянием величин развиваемых давлений (рис. 78). Однако характерно, что во всех опытах с железными порошками, когда воспламенение распространялось на весь объем пылевого облака, приращение давления не опускалось ниже 0,05  $\text{кг/см}^2$ .

Это дает основание за н. к. п. для железных порошков принимать значение концентрации, при которой величина приращения давления при воспламенении порошка не превышает 0,05  $\text{кг/см}^2$ . В целях более точного определения области и величины н. к. п. необходимо, чтобы условная концентрация, принятая за н. к. п., была ниже ближайшей концентрации (дающей превышение давления более чем на 0,05  $\text{кг/см}^2$ ) не более, чем на 20% и подтверждалась по меньшей мере тремя опытами.

Согласно принятой методике расчета концентрации при определении н. к. п. для железных порошков, условная концентрация, которую определяем графически, умножается на поправочный коэффициент 0,6 для определения фактической концентрации, соответствующей н. к. п.

Приводим полученные в наших опытах величины н. к. п. для железных порошков:

Порошки Сулинского завода		Порошки Броварского завода	
ПЖЗМ	110	ПЖ2М	130
Фракции мельче 50 мк порошка ПЖЗМ	66	Фракции мельче 50 мк порошка ПЖ2М	66
Фракции мельче 50 мк порошка ПЖЗС	110	ПЖ2С	110
Аспирационная пыль	85	Фракция мельче 50 мк порошка ПЖ2С	70

Более низкие значения н. к. п. для железных порошков по сравнению с данными зарубежных авторов [86], по-видимому, объясняются тем, что в упомянутых работах за н. к. п. принимали не фактическую концентрацию порошка в зоне воспламенителя, а отношение массы распыляемого порошка к объему взрывной камеры. Фактическая же концентрация, вследствие неравномерности распределения твердой фазы в камере и изменения ее содержания во времени, была иной.

На основании исследований порошков алюминия, магния и алюминий-магниевого сплава установили следующие значения н. к. п. ( $г/м^3$ ): ПА — 120; ПП-4 — 80; ПАК-4 — 45; Mg — 20; ПАМ — 30. Различия н. к. п. взрываемости алюминиевых порошков вызваны, в основном, крупностью и формой частиц.

### ВЕРХНИЙ КОНЦЕНТРАЦИОННЫЙ ПРЕДЕЛ ВЗРЫВАЕМОСТИ

Переходя к методикам определения в. к. п., следует отметить, что данных о в. к. п. намного меньше, чем о н. к. п. Это связано в основном с трудностями получения аэрозвеси, требуемой (очень высокой) концентрации и достаточно равномерного распределения ее в принятом объеме. Для некоторых металлических пылей в. к. п. достигает многих килограммов на  $1 м^3$ .

Известны экспериментальные результаты, полученные для угольной пыли в опытных штреках; определению в. к. п. в лабораторных условиях посвящены лишь единичные работы [231, 232]. Ввиду ограниченности сведений о в. к. п. рассмотрим их, не исключая данных о неметаллических материалах.

По данным Х. Ханелля [233], для взрывоопасных сортов бурого угольной пыли во Фрайбергском опытном штреке в. к. п. изменялся от 2000 до 7000  $г/м^3$ . Согласно работе Н. Брунцеля [234], в. к. п. для бурого угольной пыли составляет 4000  $г/м^3$  при содержании влаги 2,2% и 2000  $г/м^3$  при влажности 13,3%. Этот же автор, ссылаясь на малочисленные данные о в. к. п. для угольной пыли, пишет, что его принято считать равным 2000  $г/м^3$ . В. Цибульский [235] установил, что в опытном штреке в. к. п. для угольной пыли равен 900  $г/м^3$ , независимо от содержания летучих, зольности угля и размеров частиц. В работе П. Боерсдорфера [231] в. к. п. указан только для сахарной пыли — 1350  $г/м^3$ .

Значительные расхождения значений в. к. п. объясняют обычно тем, что в. к. п. не является строгим критерием и для одного и того же материала может изменяться в широких пределах. Нам представляется, что определенную роль здесь играет также несовершенство существующих методик определения в. к. п.

Рассматривая методики определения верхнего предела взрываемости, следует упомянуть о расчетных методах. Возможны по меньшей мере два подхода к решению данной задачи.

При термохимическом методе исходят из химического состава конечных продуктов сгорания, получающихся при недостатке кислорода в аэрозоле для полного сгорания исходного вещества частиц [236, 237]. Результаты расчетов, приведенные И. Цером [232], представлены в табл. 8. Однако в расчетах не учитывается дисперсный состав пыли: рассматривается идеальная пыль с частицами-молекулами; также не учитываются неизбежные тепловые потери. Это приводит к завышению значений в. к. п. по сравнению с фактическими.

Таблица 8

Вещество	Принятый продукт окисления	В. к. п. · 10 <sup>5</sup> , г/см <sup>3</sup>
Углерод	CO	1400—1500
Магний	MgO	5500—6000
Алюминий	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6000—6300
Окись углерода (для сравнения)	CO <sub>2</sub>	>3400

Другой расчетный метод, в отличие от предыдущего, основан на калорийности продуктов. Верхний концентрационный предел находят по формуле

$$\text{в. к. п.} > \frac{Nq - Q_{\text{п}}}{(t_{\text{в}} - t_0)c_2} - \frac{\rho_1 c_1}{c_2}, \quad \text{г/см}^3. \quad (\text{III.4})$$

Здесь  $N$  — весовая концентрация пыли, при которой еще возможно полное сгорание в данном объеме воздуха, г/см<sup>3</sup>;  $q$  — теплота сгорания пыли, кал/г;  $Q_{\text{п}}$  — потери тепла, кал/см<sup>3</sup> (в идеальном случае  $Q_{\text{п}}=0$ );  $t_{\text{в}}$  — температура воспламенения пыли, °С;  $t_0$  — начальная температура, °С;  $\rho_1$  — плотность воздуха — 0,00125, г/см<sup>3</sup>;  $c_1$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме — 0,17 кал/г·град;  $c_2$  — удельная теплоемкость пыли, кал/г·град.

По этой формуле в.к.п. тем выше (следовательно, тем взрывоопаснее пыль), чем ниже температура воспламенения, выше начальная температура и теплота сгорания, а также, чем меньше потребность в кислороде для полного сгорания. Используя в расчетах экспериментальные значения температуры воспламенения, представляется возможным учесть влияние крупности частиц, зольности, влажности, минимальной энергии воспламенения и т. д.

В табл. 9 приведены результаты расчетов значений в. к. п. для некоторых пылей [232].

Таблица 9

Вещество	$N \cdot 10^6, \text{ г/см}^3$	$q, \text{ кал/г}$	$t_B, \text{ }^\circ\text{C}$	$c_2, \text{ кал/г} \cdot \text{град}$	$V, \text{ к. п.} \cdot 10^6, \text{ г/нсм}^3$
Длиннопламенный каменный уголь	154	7695	595	0,31	5960
Магний	456	6020	470	0,24	24500
Алюминий	338	7040	400	0,21	28800
Железо	695	1778	420	0,11	26100
Сера	298	2210	235	0,17	16800
Фосфор (красный)	231	5800	360	0,18	20700
Нафталин	100	9603	575	0,30	5060
Антрацен	98	9510	500	0,28	6180
Полистирол	67	9943	475	0,31	6150
Эбонит	115	7737	360	0,34	7070
Оксид углерода (для сравнения)	524	2420	650	0,25	7210

Эти числа значительно превышают рассчитанные по предыдущему методу, а также экспериментальные данные. В табл. 10 приведены расчетные и полученные Цером [232] экспериментальные значения в. к. п. для некоторых веществ.

Таблица 10

Вещество	В. к. п. $\cdot 10^6, \text{ г/нсм}^3$	
	расчетный	экспериментальный
Сера	16800	~900
Нафталин	5060	~700
Полистирол	6150	~770
Фталиевая кислота	5690	~1000
Эбонит	7070	1100—1600

Расчетные методы позволяют определить в. к. п. для случаев с пренебрежимо малыми тепловыми потерями. Однако тепловые потери следует учитывать даже тогда, когда при значительных размерах системы они сравнительно невелики. Поскольку учет потерь расчетным путем при существующей разработанности вопроса едва ли осуществим, рассмотренные аналитические методы имеют лишь теоретическое значение.

Среди методик экспериментального определения в. к. п. необходимо различать методики, предусматривающие проведение опытов при больших размерах систем, т. е. в условиях, максимально приближающихся к натурным, и на лабораторно-модельных установках [34]. Первые главным образом применяются при исследовании взрываемости угольной пыли в опытных штре-



ках. К недостаткам таких методик следует отнести довольно высокую стоимость установок и технические трудности, связанные с необходимостью равномерного запыления больших объемов воздуха до требуемой концентрации и сохранения ее неизменной в течение конечного отрезка времени.

Лабораторно-модельная установка, описанная в работе [34] и представляющая собой взрывной цилиндр с воронкой для размещения исследуемой пыли, была испытана в ИПМ АН УССР.

Как показали результаты опытов, при размещении порошка в воронке в начальный момент воздушного импульса над поверхностью еще не пришедшей в движение массы порошка появляется тонкая запыленная струя со скоростью несколько десятков метров в 1 сек, затем поднимается остальная масса; однако запыленность по высоте крайне неравномерна, диспергация порошка практически не происходит.

Применение различного типа воронок, в том числе с распределительными решетками, для выравнивания распределения воздуха по сечению воронки, также не дало положительных результатов. Порошок, вследствие большой массы и относительно малой скорости по сечению, не диспергируется и распределяется по высоте со значительным градиентом концентрации.

Концентрация пыли не остается постоянной во времени из-за оседания частиц. Использование известных (по определению н. к. п.) способов для преодоления сил тяжести — исследование в восходящем потоке газа, создание подвижности воздуха вращающимися крыльчатками — на установках для определения в. к. п. затруднено.

Для получения равномерного распределения концентрации пыли в заданном объеме И. Цер использовал идею Х. Зелле [237], предложившего сблизить частицы в исследуемом объеме настолько, чтобы они, соприкасаясь, взаимно поддерживались и сохраняли при этом относительно равные зазоры. Сблизение частиц вплоть до их взаимного соприкосновения при сохранении неизменной первоначальной массовой концентрации (отношение массы пыли к массе воздуха) возможно только при соответствующем сблизении молекул газа, что достигается за счет увеличения давления среды. Твердые частицы при этом соприкасаются по всему объему, как в рыхлой массе материала. Цер исходит из предположения, что процесс горения в сжатой пылевоздушной системе существенно не отличается от процесса в разреженной до нормального давления атмосфере и, следовательно, возможен пересчет концентрации той же массы вещества частиц отнесением ее к объему воздуха при нормальном давлении. Таким образом, определение в. к. п. сводится к измерению минимального давления воздуха в пылевом слое, при котором пламя еще распространяется по всей массе исследуемо-

го порошка. В данном случае исходят из того, что в. к. п. определяется недостатком кислорода.

Прибор для определения в. к. п. в сильно сжатой среде представляет собой цилиндрический толстостенный сосуд с внутренним объемом  $590 \text{ см}^3$ , по оси которого размещена стеклянная трубочка, заполненная исследуемой пылью. Длина ее  $23\text{--}26 \text{ см}$ , объем  $20 \text{ см}^3$ . Для поджигания используют электрический воспламенитель с головкой накаливания. Воздух сжимается четырехступенчатым поршневым компрессором, создающим максимальное давление  $1000 \text{ атм}$ . Если процесс горения распространился лишь на часть пыли в трубочке, считают, что был недостаток воздуха, а концентрация пыли, полученная по отношению к содержащемуся в трубочке воздуху, выше в. к. п. Следующий опыт проводят при большей массе воздуха, следовательно, — при большем давлении. Опыты ведутся до того времени, пока процесс распространится по всей длине трубочки. В экспериментах, проводимых Цером, давление изменялось в пределах  $40\text{--}200 \text{ атм}$ .

Сравнение принятой модели процесса и условий при атмосферном давлении показывает, что различия сводятся в основном к следующему. Сжатие среды способствует лучшему теплопереносу в системе, поскольку тепло от частицы через воздушный промежуток передается в основном за счет излучения [238] и в сжатом газе вследствие сокращения расстояний между частицами теплопередача идет лучше, чем в разреженной системе.

Большую роль играет разница в масштабе систем. При горении происходят потери тепловой энергии на границе со стенками или другими предметами, которые не участвуют в реакции, но встречаются на ее пути. Причем эти потери тем существеннее, чем меньше размеры системы;  $20 \text{ см}^3$  сжатой среды в трубочке установки Цера (при применяемых давлениях) соответствуют  $400\text{--}4000 \text{ см}^3$  при атмосферном давлении. Следовательно, в сжатой системе на единицу объема приходится приблизительно в три — шесть раз больше единиц поверхности, чем при нормальном давлении (при одинаковой геометрической форме), и во столько же раз усиливается влияние поверхности трубочки на протекание реакции. Если в каждый момент энергия выделяется в количестве, необходимом лишь для дальнейшего протекания реакции, то вследствие тепловых потерь реакция прекратится.

Влияние стенок, принимая во внимание незначительные размеры трубочки в установке Цера, занижает в. к. п. по сравнению со значениями, полученными на практике. В этом убедился и сам Цер, для сравнения проводя опыты на большей трубочке объемом  $125\text{--}130 \text{ см}^3$  и с соотношением *поверхность/объем* равным  $1,7: 1$ . Следует отметить, что данная методика неприменима для веществ с низкой температурой плавления. Процесс горения

быстро прекращается вследствие образования на границе между сгоревшей пылью довольно толстого, практически воздухонепроницаемого оплавленного слоя. Пылевые частицы плавятся в результате действия фронта повышенных температур, опережающего реакционный фронт. При большом расстоянии между частицами этот эффект не имеет существенного значения. Однако тесное соприкосновение частиц (как в упомянутых опытах) приводит к слиянию отдельных капелек расплавленного вещества в общую массу, которая вследствие исключительно сильного уменьшения реакционно активной поверхности теряет присущий пыли характер (отдельные капельки еще сохраняли его). В таких условиях горение прекращается. Применение инертных добавок предотвращает сбегание расплавленных капелек, однако опыты такого рода не позволяют определить истинное значение в. к. п. исследуемой пыли; они лишь показывают, в какой мере снижается этот предел за счет примеси инертной пыли.

Получение достоверных данных невозможно, если трубочка при горении вещества растрескивается. Концентрация пыли будет существенно отличаться от расчетной, если исходить из того, что в реакции участвует воздух, находящийся в трубочке. Трубочки растрескиваются при испытаниях веществ, горение которых у верхнего предела взрываемости протекает интенсивно; к ним относятся металлические пыли (например Mg, Al). В этом случае стекло трубочки растрескивается на мелкие кусочки, сплавляющиеся со шлаком окислов.

Таким образом, данные, получаемые по методике испытаний порошка в сильно сжатой среде, мало достоверны. Кроме того, применение этой методики для исследования металлических порошков, горение которых сопровождается образованием сильно раскаленных окислов, связано с существенными трудностями.

Нами были проведены опыты по определению в. к. п. взрываемости железных порошков на установке ИПМ. Применили распылитель с вихревой камерой и распределительной решеткой (см. рис. 59). Распылителем такого типа создавали концентрацию во взрывном цилиндре объемом  $1200 \text{ см}^3$  до  $50 \text{ кг/м}^3$ . Как отмечалось ранее (см. рис. 75), при концентрации железного порошка ПЖЗМ мельче  $50 \text{ мк}$  выше  $10\text{—}15 \text{ кг/м}^3$  рост давления прекращается, а при дальнейшем увеличении концентрации давление падает. Это объясняется тем, что данного количества кислорода уже недостаточно для интенсивного горения частиц, хотя еще выделяется тепло в количестве, достаточном для воспламенения соседних частиц и распространения пламени. Кроме недостатка кислорода при повышении концентрации порошка существенную роль в снижении давления при взрыве играет поглощение тепла массой частиц.

О верхнем концентрационном пределе можно судить по величине задержки момента начала воспламенения порошка (при увеличении концентрации) и по фактической концентрации порошка в районе воспламенителя. Так, для фракций порошка ПЖЗМ мельче 50 мг при расчетной концентрации равной  $24 \text{ кг/н.м}^3$ , задержка момента воспламенения составляет 0,4 сек. Фактическую концентрацию порошка определяют на основании пробоотбора. С учетом графика относительной концентрации (см. рис. 64) фактическая концентрация в момент 0,4 сек была равна  $24 \cdot 0,6 = 15 \text{ кг/н.м}^3$ . Для расчетной концентрации около  $40 \text{ кг/н.м}^3$  задержка воспламенения составляла 0,6 сек, поэтому фактическую концентрацию можно принять равной  $40 \cdot 0,36 = 14,5 \text{ кг/н.м}^3$ . Таким образом, в. к. п. может быть принят равным около  $15 \text{ кг/м}^3$  для фракций мельче 50 мк порошка ПЖЗМ. Более грубые порошки имеют более низкую величину в. к. п. Так, из рис. 77 видно, что у порошка ПЖ2М при концентрации  $6,0 \text{ кг/м}^3$  приращение давления составляет всего  $0,3 \text{ кг/см}^2$ . В этом случае в. к. п. наступает раньше из-за меньшей активности грубых частиц.

#### МИНИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА И ЭНЕРГИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ РАСПЫЛЕННЫХ ПОРОШКОВ

В качестве температуры воспламенения аэровзвеси некоторые исследователи [229] принимают минимальную температуру воспламенителя (регулируемую в процессе опыта), при которой порошок еще воспламеняется.

В действительности, температура воспламенителя, необходимая для устойчивого воспламенения исследуемого порошка, в зависимости от условий опыта, может значительно превышать температуру воспламенения.

Необходимая для воспламенения взвешенных в газе частиц температура воспламенителя по мере увеличения времени нахождения частиц в зоне действия воспламенителя приближается к температуре воспламенения.

Это обстоятельство многими исследователями не учитывалось, в связи с чем значение температуры воспламенения одних и тех же порошков, по данным различных авторов, колеблется в широких пределах; например, для распыленных железных порошков температура воспламенения равна  $300\text{—}600^\circ \text{C}$ .

Время нахождения взвешенных частиц порошков в зоне действия воспламенителя является определяющим фактором, влияющим на величину превышения температуры воспламенителя, при которой происходит воспламенение, по отношению к фак-

тической температуре воспламенения порошка. В меньшей мере на необходимую температуру воспламенителя влияют размеры взрывной камеры и концентрация распыленного порошка.

Ниже остановимся на результатах исследований воспламеняемости аэрозвеси порошков, полученных по двум методикам. Определяли минимальную температуру воспламенителя, при которой происходит воспламенение аэрозвеси. Эти опыты проводили во взрывной камере с воспламенителем в виде нагретой спирали. Минимальную температуру воспламенения аэрозвеси порошков определяли в вертикальной трубчатой печи.

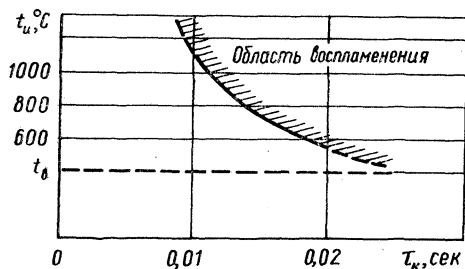


Рис. 79. Зависимость минимальной температуры воспламенителя, при которой происходит воспламенение железного порошка ПЖЗМ, от времени нахождения порошка в зоне воспламенителя.

По характеру кривой можно приблизительно судить о температуре воспламенения  $t_v$ . При  $\tau = 0,02$  сек величина  $t_n$  была равна около  $500^\circ\text{C}$ .

Порошок ПЖЗМ мельче  $50 \text{ мк}$  воспламенялся при наиболее низкой температуре воспламенителя по сравнению со всеми исследованными железными порошками. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные зависимости развиваемого при взрыве давления от температуры воспламенителя (рис. 80). Пыль из аспирационной системы воспламенялась при температуре  $600^\circ\text{C}$ , но в этом случае приращение давления было низким ( $0,2 \text{ кг/см}^2$ ), поскольку энергия, приобретенная частью порошка, прошедшего через воспламенитель, была еще недостаточна для воспламенения всей массы распыленного порошка. При температуре  $700^\circ\text{C}$  аспирационная пыль и порошок ПЖЗМ мельче  $50 \text{ мк}$  воспламенялись во всем объеме взрывной камеры, что вызывало прирост давления на величину около  $1,6 \text{ кг/см}^2$ . Навеска порошков во всех опытах составляла  $1,0 \text{ г}$ , масса распыленного порошка — около  $0,5 \text{ г}$ . Дальнейшее повышение температуры практически не приводило к увеличению давления, развиваемого при взрыве порошка ПЖЗМ мельче  $50 \text{ мк}$  и пыли

из аспирационной системы. Порошок ПЖЗМ воспламенялся при  $800^{\circ}\text{C}$ , а ПЖЗС не воспламенялся до температуры  $1100^{\circ}\text{C}$ .

Температуру воспламенения порошка определяли, распыляя порошок в вертикальной трубчатой печи. Внутренний диаметр реакционной трубки печи 40 мм, длина 600 мм, максимальная температура  $1200^{\circ}\text{C}$ .

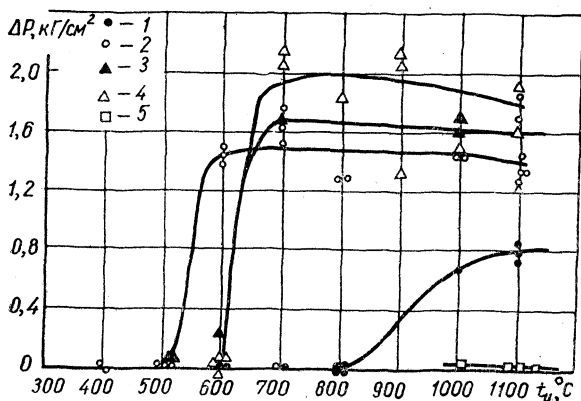


Рис. 80. Зависимость давления, развиваемого при взрыве, от температуры воспламенителя:

1 — ПЖЗМ; 2 — ПЖЗМ мельче 50 мк; 3 — аспирационная пыль; 4 — аспирационная пыль мельче 50 мк; 5 — ПЖЗС.

Распыленный порошок после печи попадает в специальную камеру с огнегасительными решетками, частично осаждается в ней, а более мелкие частицы осаждаются в тканевом фильтре. Распыляли навески порошков 200 мг, что соответствовало концентрации 400—600 мг/л, т. е. значительно выше н. к. п.

Таблица 11

Порошок	Температура ( $^{\circ}\text{C}$ ), при которой порошок	
	еще не воспламеняется	воспламеняется
ПА	1000	1050
ПП-4	930	950
ПАК-4	680	700
Магний	600	620

Максимальная температура печи (в центральной части у стенки) контролировалась термопарой в сочетании с потенциометром. За воспламенением наблюдали при прохождении облака между нижним концом реакционной трубки печи и огнегасительным патрубком камеры. При отсутствии воспламенения температуру повышали на  $20^{\circ}\text{C}$ . В случае воспламенения по-

рошка опыты при ближайшей, более низкой температуре, не вызывающей воспламенения, повторяли шесть раз.

В процессе опытов установили, что наиболее активный из железных порошков — порошок ПЖЗМ (фракции мельче 50 мк) — имеет температуру воспламенения 300°С.

В табл. 11 приведены результаты экспериментального определения температуры воспламенения порошков алюминия и магния.

Наряду с минимальной температурой воспламенения взровеси, характеризующей взрывоопасность порошка при относительно длительном пребывании в зоне с повышенной температурой, важным показателем взрывоопасности является минимальная энергия воспламенения, т. е.

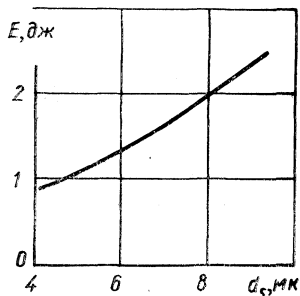


Рис. 81. Зависимость минимальной энергии воспламенения железных порошков от крупности частиц.

энергия, выделение которой даже за незначительный отрезок времени (например, в виде искры механического или электрического происхождения) способно воспламенить порошок.

В случае теплового воспламенителя, располагая данными о токе и напряжении, обеспечивающими минимальную температуру воспламенителя, выше которой уже наблюдается воспламенение порошка при данном времени пребывания частиц порошка в зоне воспламенителя, можно приблизительно рассчитать минимальную энергию воспламенения порошка от нагретого тела. Так, для фракции порошка ПЖЗМ мельче 50 мк  $t_u = 500^\circ\text{C}$ ;  $I = 6,5 \text{ а}$ ;  $U = 4,5 \text{ в}$ ;  $\tau = 0,02 \text{ сек}$ ;  $Q = 0,239 \cdot 6,5 \cdot 4,5 \cdot 0,02 = 0,143 \text{ кал}$ ; а  $E = 0,59 \text{ дж}$ .

Порошок ПЖЗС не воспламеняется при  $t_u = 1100^\circ\text{C}$ . Следовательно, энергия 3,7 дж недостаточна для воспламенения порошка.

По экспериментальным данным была построена зависимость минимальной энергии воспламенения железных порошков от среднего (по поверхности) диаметра частиц (рис. 81).

Таблица 12

Порошок	Ток, а	Напряжение, в	Минимальная энергия воспламенения, мдж
ПА	13,0	9,2	1170
ПП-4	12,6	8,8	1080
ПАК-4	7,0	4,8	328
Магний	6,0	4,2	246
ПАМ	6,5	4,5	287

В табл. 12 приведены значения минимального количества тепла и минимальной энергии воспламенения от нагретого тела газозвеси порошков алюминия и магния.

### ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ НА ПАРАМЕТРЫ ВЗРЫВА

Характеристики взрываемости порошков в значительной степени зависят от крупности частиц. Более мелкие порошки имеют более низкие температуру воспламенения и уровень н. к. п., выше скорость нарастания давления и величину максимального давления. Это обусловлено тем, что с уменьшением размеров частиц площадь их поверхности быстро возрастает в силу квадратичной зависимости. Активность порошка повышается.

Вместе с тем большинство авторов, приводя характеристики взрываемости порошков, если и упоминают о дисперсном составе, то лишь по данным ситового анализа, не отражая распределения размеров частиц мельче 50 мк. Опубликованы лишь скурые сведения об алюминиевых и угольных порошках, размеры частиц которых меньше 50 мк.

На рис. 82 и 83 представлены характеристики взрываемости алюминиевой и угольной пыли, полученные авторами работ [86] и [87].

Согласно данным работы [86], максимальное избыточное давление и скорость нарастания давления находятся в экспоненциальной зависимости от крупности частиц. Величина н. к. п. для распыленного алюминия не зависит от диаметра частиц при крупности менее 40—50 мк и значительно возрастает для более крупных частиц. Активность угольной пыли [87] повышается с уменьшением размеров частиц во всем исследованном диапазоне концентраций (до 1500 г/м<sup>3</sup>). Наиболее тонкий порошок состоял из частиц с размерами 5—20 мк.

Данные о влиянии крупности частиц на характеристики взрываемости железных порошков в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют. О влиянии крупности железного порошка на взрываемость можно судить по результатам, полученным при исследовании зависимости максимального давления от концентрации частиц различных порошков (см. рис. 76, 77).

Согласно графическим зависимостям для сулинских порошков, фракции порошка ПЖМ мельче 50 мк и пыль из аспирационных систем развивают при взрыве близкие по величине максимальные давления, около 2 кг/см<sup>2</sup>. Более крупные порошки ПЖМ и фракции порошка ПЖС < 50 мк развивают при взрыве значительно меньшие давления (0,8—1,3 кг/см<sup>2</sup>), а еще более крупный порошок ПЖС не взрывается вообще.



На рис. 84 и 85 представлены графики зависимости н. к. п. и  $\Delta P$  от среднего диаметра  $d_s$ , вычисленного для всех порошков

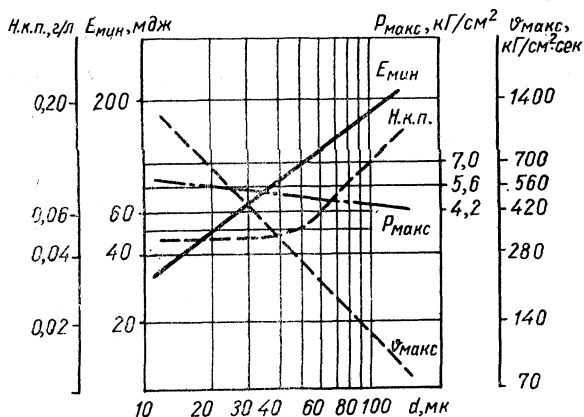


Рис. 82. Зависимость параметров взрываемости от среднего размера частиц распыленного алюминия.

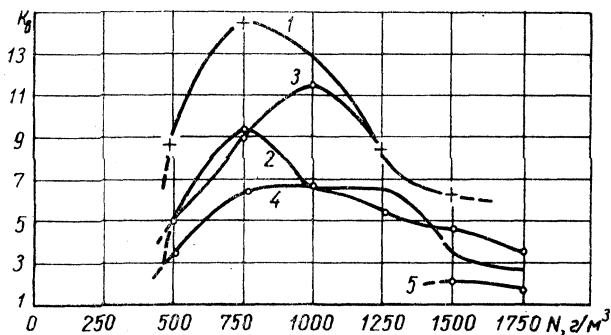


Рис. 83. Зависимость коэффициента взрыва угольной пыли от концентрации при различной крупности частиц: 5—20 (1); 20—60 (2); 0—70 (3); 0—75 (4); 40—75 мк (5).

по определяющему свойству [110] (см. гл. II). В качестве определяющего свойства принята удельная поверхность порошка, поскольку в основном она определяет активность порошка. При этом допустили, что структура и форма частиц не зависит от крупности порошка. Без существенного ущерба для достоверности результата эту закономерность можно распространить и на более тонкие частицы для области, в которой еще сохраняются структурные и текстурные особенности отдельных зерен.

Характерно, что основная доля поверхности частиц в порошках приходится на мелкие частицы диаметром около 5 мк (см. рис. 84 и 85). Н. к. п. с увеличением крупности порошка заметно растет, а давление, развиваемое при взрыве, падает.

Приводимые в литературе данные взрываемости порошков относят в большинстве случаев к крупности частиц не по определяющему свойству, а к средним диаметрам частиц по весовому содержанию фракций  $d_B$ . Для сопоставления на рис. 86 и 87 приведены полученные нами данные о величине н. к. п. и  $\Delta P$  в зависимости от  $d_B$ .

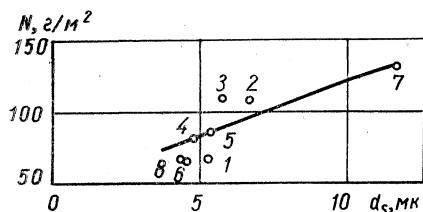


Рис. 84. Зависимость н.к.п. от  $d_s$  для сулинских (1—5) и броварских (6—8) порошков:

1 — ПЖЗМ мельче 50 мк; 2 — ПЖЗМ; 3 — ПЖЗС мельче 50 мк; 4 — аспирационная пыль мельче 50 мк; 5 — аспирационная пыль; 6 — ПЖЗМ мельче 50 мк; 7 — ПЖЗМ; 8 — ПЖЗС мельче 50 мк.

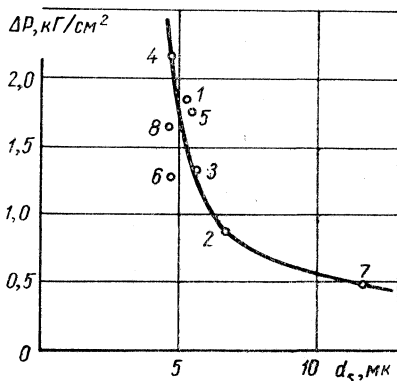


Рис. 85. Зависимость  $\Delta P$  от  $d_s$ . Обозначения те же, что на рис. 84.

Исследовали также влияние крупности частиц на давление, развиваемое при взрыве, в более узком диапазоне диаметров частиц, чем диапазоны крупности частиц товарных порошков. Для этой цели сулинский порошок ПЖЗМ с помощью сит разделили на следующие фракции: <50, 50—56, 56—70, 70—100 и 100—160 мк.

Порошок с частицами мельче 50 мк воздушной сепарацией разделили на несколько фракций с более узкими диапазонами крупности частиц. Для разделения использовали схему с последовательной сепарацией в восходящем потоке и в циклоне. Наиболее мелкие фракции осаждались в фильтре на выходе из системы. Для разделения порошка на фракции изменяли режимы сепарации — скорость восходящего потока и скорость воздуха на входе в циклон.

Давление взрыва фракций порошка ПЖМ исследовали во взрывной камере. Массу распыляемых проб во всех случаях принимали равной 0,5 г.

График зависимости приращения давления при взрыве от крупности частиц (рис. 88) построен по средним арифметиче-

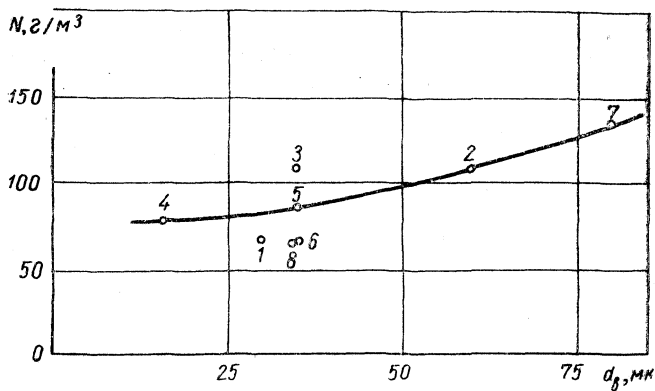


Рис. 86. Зависимость н.к.п. от  $d_p$ .  
Обозначения те же, что на рис. 84.

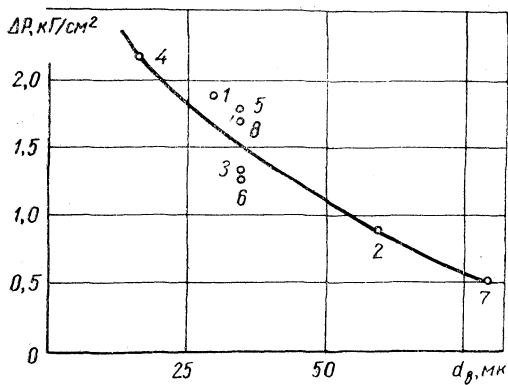


Рис. 87. Зависимость  $\Delta P$  от  $d_p$ .  
Обозначения те же, что на рис. 84.



Рис. 88. Влияние крупности частиц на  
давление взрыва.

ским значениям давлений. Для каждого порошка проведено по четыре—восемь опытов.

Величина  $\Delta P$  резко уменьшается с увеличением диаметра частиц и для частиц 70—100  $\mu\text{к}$  составляет около 0,1  $\text{кг}/\text{см}^2$ . Это свидетельствует о том, что железные порошки, крупностью более 70  $\mu\text{к}$ , практически не взрывоопасны; следует, однако, заметить, что данная особенность относится к порошкам, до некоторой степени окисленным (см. следующий раздел).

Средний по поверхности диаметр частиц, определенный методом пересчета по данным дисперсного анализа, и диаметры коллективов частиц, полученных разделением порошка на фракции методом сепарации, не соответствуют истинной величине поверхности частиц.

В связи с этим для установления зависимости характеристик взрываемости порошка от крупности частиц необходимо располагать данными об удельной поверхности порошка.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ОКИСЛЕННОСТИ ПОРОШКОВ НА ИХ ВЗРЫВАЕМОСТЬ

Различную степень окисленности создавали искусственно, нагревая исходный порошок при заданной температуре в воздухе в течение различного времени. Порошок нагревали при температуре 200 и 300° С в течение 15; 30 мин, 1 и 3 ч. При температуре 200° С порошок нагревали еще и в течение 5 ч. О степени окисленности судили по содержанию кислорода, полагая, что при невысокой температуре процесс окисления не мог идти дальше образования FeO.

Содержание кислорода определяли на установке Института газа АН УССР, в основу которой положен принцип автоматической фиксации изменения массы пробы порошка в процессе его восстановления чистым водородом. Трансформация механических характеристик в электрические на установке осуществляется с помощью механоэлектрического преобразователя. Установки с такими преобразователями имеют преимущества по сравнению с другими подобного типа.

Для опытов выбрали один из наиболее активных порошков — фракции мельче 50  $\mu\text{к}$  сулинского порошка ПЖЗМ. Химический состав исходного порошка, %: Fe — 96,5; Mn — 0,36; C<sub>общ</sub> — 0,14; Si<sub>общ</sub> — 0,28; S — 0,035; P — 0,03.

Степень окисленности исходного порошка была приблизительно на 1,5% выше, чем у стандартного порошка ПЖЗМ, содержащего 98% Fe. Параллельно с определением содержания кислорода на установке все образцы, отличающиеся степенью

окисленности, подвергались химическим анализам на содержание общего железа. Принимая во внимание химический состав исходного порошка, без существенной погрешности можно считать, что уменьшение содержания железа соответствует увеличению содержания кислорода примерно на такую же величину. Таким образом, достоверность полученных результатов можно оценивать, сопоставляя данные определения степени окисленности на установке, и содержания железа — по химическим анализам.

Сопоставление результатов показывает удовлетворительное их совпадение (табл. 13).

Характеристики взрываемости порошков с различной степенью окисленности определяли, распыляя во взрывной камере одно и то же количество порошка ( $N=0,5 \text{ г/л}$ ).

Активность железного порошка с повышением степени окисленности быстро понижается (рис. 89). При увеличении содержания кислорода от 1,5 до 3,0% максимальный прирост давления падает почти в три раза (с 0,6 до 0,2  $\text{кг/см}^2$ ), а при

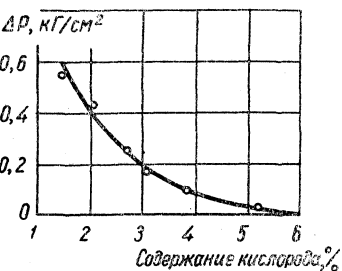


Рис. 89. Влияние содержания кислорода в порошке на величину приращения давления при взрыве.

содержании кислорода 5% порошок вообще не взрывается.

Влияние степени окисленности порошков на их взрывоопасность в настоящее время изучено совершенно недостаточно. В литературе лишь упоминается об особой активности и опас-

Таблица 13

Методика определения содержания кислорода	200° С				300° С			
	Время нагревания, мин							
	15	60	180	300	15	30	60	180
Восстановление в водороде	2,0	2,93	3,22	—	3,27	3,89	5,55	—
Химический анализ	2,2	2,6	3,0	3,3	3,2	—	4,8	6,3

ности свежеприготовленных порошков. Только в работе [239] дается качественная оценка взрываемости порошков Ti, Zr и Si. После четырехмесячного хранения свежеприготовленных порошков Ti и Zr их нижние концентрационные пределы соответственно повысились с 48 до 80 и с 55 до 64  $\text{г/м}^3$ , а порошок Si, н. к. п. которого равен 120  $\text{г/м}^3$ , после четырехмесячного хранения не воспламенялся.

## ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КИСЛОРОДА НА ВЗРЫВАЕМОСТЬ ПОРОШКОВ

Содержание кислорода в газе существенно влияет на характер протекания процесса взрыва, поскольку тепловой взрыв происходит в основном за счет интенсивной экзотермической реакции окисления вещества. Уменьшение содержания кислорода понижает взрывную активность аэрозвесей порошков. По данным исследований [182], при содержании кислорода более высоком, чем в воздухе (т. е. больше 21%), активность порошка повышается незначительно. Следует, однако, учитывать, что это относится к области концентраций значительно ниже в.к.п. При нормальных условиях и концентрации порошка в области в.к.п. активность его резко падает вследствие большого теплоотвода и недостатка кислорода. Увеличение концентрации кислорода в этом случае приводит к существенному повышению активности порошка.

Характерно, что не все вещества при уменьшенном содержании кислорода теряют взрывную активность. Порошки некоторых металлов могут воспламеняться с последующим взрывом и при отсутствии кислорода в среде, с которой вещество способно реагировать с выделением тепла. Такой средой могут быть азот, углекислый газ, аргон и др. Поэтому при разработке методов предотвращения взрывов с применением инертных сред к выбору среды следует подходить с особой осторожностью.

Проведены исследования влияния защитной газовой среды на взрываемость порошков ПА, ПП, ПАК, Mg, ПАМ. Методика опытов заключалась в следующем.

Приготовленную смесь газов из расходного цилиндра перепускали в предварительно вакуумированную взрывную камеру. Порошок помещали в распылитель до момента вакуумирования. Создаваемые в системе давления контролировали манометром с ценой деления  $0,05 \text{ кг/см}^2$ , а концентрацию кислорода — газоанализатором. Навеска порошка для распыления во всех опытах составляла 4 г, что соответствовало концентрации около 0,8 г/л, при которой наблюдали максимальные значения давления взрыва аэрозвеси.

Во всех опытах в качестве инертного газа использовали азот высокой чистоты, а при испытании порошков магния и алюминиево-магниевое сплава — также аргон, поскольку в чистом азоте указанные порошки воспламенялись.

В табл. 14 приведены предельные концентрации кислорода в азоте.

С уменьшением концентрации кислорода давление при взрыве снижается вначале медленно, а затем резко. В случае превышения содержания кислорода в инертном газе выше предельного

даже на 0,5% воспламенение порошка приводит к сильному взрыву. Магниевый порошок при воспламенении в чистом азоте взрывается и создает давление 3 кГ/см<sup>2</sup>.

Алюминиево-магниевый порошок менее активен. При воспламенении его в чистом азоте давление взрыва составляет 0,6 кГ/см<sup>2</sup>.

Таблица 14

Порошок	Содержание кислорода в азоте (%), при котором порошок	
	воспламеняется	не воспламеняется
ПА	12,5	12,0
ПП-4	7,5	7,0
ПАК-4	3,5	3,0
Магний	0	—
ПАМ	0	—

С целью определения состава инертной среды для указанных порошков исследовали их воспламеняемость в смесях аргона с воздухом и в чистом аргоне.

При наличии в аргоне кислорода в количестве 0,5% оба порошка воспламеняются и создают высокие давления: ПАМ — 0,6 кГ/см<sup>2</sup>, магний — 2,6 кГ/см<sup>2</sup>. В чистом аргоне порошки ПАМ и магниевый не воспламеняются.

### СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О ПИРОФОРНОСТИ И ВЗРЫВАЕМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Достоверные данные о пирофорности и взрываемости порошков крайне необходимы для проектирования взрывобезопасной технологии получения и применения порошков, а также для обеспечения безопасности на действующих предприятиях.

За последние годы накоплен экспериментальный материал, однако, вследствие отсутствия стандартной аппаратуры и несовершенства методов исследований, полученные различными авторами данные весьма противоречивы. Большинство авторов, говоря о пирофорности и взрывоопасности, не приводят данных о физико-химических свойствах порошков и условиях эксперимента. Один из важнейших показателей, влияющих на взрывоопасность порошков, их дисперсный состав, приводится, в лучшем случае, по данным ситового анализа. Содержание наиболее взрывоопасных фракций мельче 50 мк обычно не указывается, также как и степень окисленности порошков.

В табл. 15 приведены показатели пирофорности и взрываемости металлических порошков, опубликованные в литературе

[41, 86, 181, 182, 184, 185, 190, 194, 197, 199, 201, 208, 219, 225, 232, 239, 241—243], а также полученные в наших исследованиях.

На основании анализа литературных данных в таблице 15 приведены показатели наиболее высокой пирофорности и взрываемости порошков. Порошки расположены по степени уменьшения взрывоопасности.

В данной таблице приведены сведения, в основном, о наиболее распространенных порошках чистых металлов, кремния и некоторых соединений и сплавов. Характеристики порошков ряда других сплавов можно найти в приведенных выше работах.



Материал	Средний диаметр частиц, мк	Порошок в слое		
		Температура самовоспламенения, °С	Температура воспламенения, °С	Минимальная энергия воспламенения, мДж
Цирконий	6 <sup>185</sup> ; 3 <sup>86</sup>	190 <sup>86</sup>	180 <sup>185</sup>	0,0004 <sup>201</sup>
Уран <sup>86</sup>	— 10	100	—	—
Титан	<40; 10 <sup>86</sup>	510 <sup>86</sup>	397 <sup>197</sup>	0,008 <sup>201</sup>
Магний	<71; <74 <sup>86</sup>	490 <sup>86</sup>	420 <sup>197</sup>	0,24 <sup>182</sup>
Алюминий	<20; <44 <sup>86</sup>	470 <sup>184</sup>	—	1,6 <sup>201</sup>
Алюминиево-магниевый сплав	<50; <44 <sup>86</sup>	—	—	—
Торий <sup>86</sup>	— 7	280	—	0,004 <sup>201</sup>
Силикокальций	<50; 2 <sup>88</sup>	490	640	—
Железо карбонильное	<50; <74 <sup>86</sup>	310 <sup>86</sup>	500	—
Ферротитан <sup>86</sup>	— <74	400	—	—
Железо восстановленное	<50; —	475 <sup>185</sup>	350 <sup>185</sup>	—
Кремний	— <74 <sup>86</sup>	790 <sup>86</sup>	—	—
Бор <sup>86</sup>	— <44	400	—	—
Ферромарганец	<74 <sup>86</sup> —	240 <sup>86</sup>	—	8 <sup>201</sup>
Марганец	<44 <sup>86</sup> —	240 <sup>86</sup>	—	—
Хром <sup>86</sup>	3 <sup>86</sup> —	400	—	—
Тантал <sup>86</sup>	<44 <sup>86</sup> —	290 <sup>185</sup>	420 <sup>185</sup>	—
Олово <sup>86</sup>	<53 <sup>86</sup> —	430	—	—
Цинк	<74 <sup>86</sup> —	460 <sup>86</sup>	600 <sup>184</sup>	—
Бронзовая пудра <sup>86</sup>	<53 —	190	—	—
Ферросилиций	<50; <74 <sup>86</sup>	—	—	—
Ванадий <sup>86</sup>	<74 —	490	—	—
Сурьма <sup>86</sup>	<74 —	330	—	—
Кадмий <sup>86</sup>	<74 —	250	—	—
Феррованадий <sup>86</sup>	<74 —	400	—	—
Феррохром <sup>86</sup>	<74 —	670	—	—
Свинец <sup>86</sup>	<53 —	270	—	—
Теллур <sup>86</sup>	<44 —	340	—	—
Молибден	<74 <sup>86</sup> —	310 <sup>185</sup>	530 <sup>185</sup>	—
Кобальт <sup>86</sup>	<44 —	370	—	—
Вольфрам	<74 <sup>86</sup> —	460 <sup>185</sup>	620 <sup>185</sup>	—
Бериллий <sup>86</sup>	1 —	540	—	—
Медь <sup>88</sup>	<44 —	—	—	—
Никель	<50 <sup>194</sup> —	470 <sup>185</sup>	—	—

Примечание. Цифры в последней колонке обозначают концентрацию кислородно-воспламеняются в чистом газе. Величины в к. п. получены для алюминия 1,0 г/л, воспламеняется при нормальных условиях. Цифры, указанные справа сверху турного источника. Величины, не имеющие ссылок на литературный источник, —

## Взвешенная в воздухе пыль

Воспламеняемость		Взрывчатые свойства					Безопасная концентрация кислорода в газе, %
Температура воспламенения, °С	Минимальная энергия воспламенения, мДж	Нижний концентрационный предел, г/м <sup>3</sup>	Верхний концентрационный предел, кг/м <sup>3</sup>	Максимальное давление при взрыве, кг/см <sup>2</sup>	Максимальная скорость нарастания давления, кг/см <sup>2</sup> ·сек		
<b>I группа</b>							
20 <sup>182</sup>	5 <sup>201</sup>	40 <sup>194</sup>	—	4,5 <sup>184</sup>	445 <sup>201</sup>	(+У; +А) <sup>184</sup> ; (3Ар; 5Г) <sup>86</sup>	
20	25	60	—	3,71	238	+У; 1А; 2Ар; 2Г	
330 <sup>194</sup>	10 <sup>201</sup>	25	—	5,0 <sup>184</sup>	700 <sup>184</sup>	+У <sup>86</sup> ; 0А; 1Ар; 7Г <sup>86</sup>	
450	0,025 <sup>199</sup>	10 <sup>181</sup>	24,5 <sup>232</sup>	6,6	630 <sup>86</sup>	+У <sup>86</sup> ; +А; 0Ар	
645 <sup>184</sup>	0,047 <sup>199</sup>	25 <sup>182</sup>	28,8 <sup>232</sup>	8,0	1400 <sup>86</sup>	2У <sup>86</sup> ; 3А	
530 <sup>219</sup>	0,047 <sup>199</sup>	25 <sup>242</sup>	—	6 <sup>86</sup>	700 <sup>86</sup>	+У <sup>86</sup> ; +А; 0Ар	
270	5	75	—	3,5	230	+7У; 2А; 2Ар; 5Г	
<b>II группа</b>							
540 <sup>86</sup>	150 <sup>8</sup>	42	—	6,6	300 <sup>86</sup>	8А	
320 <sup>194</sup>	20 <sup>86</sup>	105 <sup>86</sup>	—	3,0 <sup>86</sup>	170 <sup>86</sup>	10У <sup>86</sup>	
370	80	140	—	3,7	670	13У	
<b>III группа</b>							
300	80	66	15	2,5	50	11У <sup>86</sup>	
770 <sup>219</sup>	2,1 <sup>199</sup>	100 <sup>195</sup>	—	5,8 <sup>86</sup>	840 <sup>86</sup>	(12У; 11А) <sup>86</sup>	
470	60	100	—	6,3	170	—	
450 <sup>184</sup>	0,25 <sup>199</sup>	130 <sup>184</sup>	—	3,3 <sup>86</sup>	300 <sup>86</sup>	—	
460 <sup>86</sup>	180 <sup>41</sup>	90 <sup>41</sup>	—	3,4 <sup>86</sup>	200 <sup>86</sup>	15У <sup>86</sup>	
580	140	190 <sup>194</sup>	—	4	280	14У	
630	120	200	—	3,5	180	—	
630	80	190	—	2,6	90	16У	
<b>IV группа</b>							
600 <sup>194</sup>	0,15 <sup>199</sup>	480 <sup>240</sup>	—	3,5 <sup>86</sup>	130 <sup>86</sup>	10УА <sup>86</sup>	
370	—	1000	—	3,0	90	—	
860 <sup>86</sup>	280 <sup>240</sup>	150	—	6,2 <sup>86</sup>	260 <sup>86</sup>	16У <sup>86</sup> ; 15А	
500	60	220	—	3,4	42	10У	
420	1920	420	—	0,56	7	16У	
570	4000	—	—	0,49	7	—	
440	400	1300	—	—	—	17У	
790	—	2000	—	—	—	19У	
<b>V группа</b>							
710	—	—	—	—	—	—	
550	—	—	—	—	—	—	
720 <sup>86</sup>	—	—	—	—	—	—	
760	—	—	—	—	—	—	
780 <sup>86</sup>	—	—	—	—	—	—	
910	—	—	—	—	—	—	
700	—	—	—	—	—	—	
—	—	220 <sup>184</sup>	—	—	—	—	

рода. буквы — газ-разбавитель: А — азот; Ар — аргон; Г — гелий; У — углекислый газ и магния расчетным методом. Цирконий и уран — в количестве, большем 1,0 г или у наименований порошков и экспериментальных величин, обозначают номер литературных данных.

1. Веселовский В. С. и др. Самовозгорание промышленных материалов. «Наука», М., 1964.
2. Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Коротков А. И. — Физика горения и взрыва, 1968, 3.
3. Бржустовский Т., Глассмен И. — В кн.: Гетерогенное горение. «Мир», М., 1967, 59.
4. Бржустовский Т., Глассмен И. — В кн.: Гетерогенное горение. «Мир», М., 1967, 91.
5. Вуд В. А. — В кн.: Исследование ракетных двигателей на твердом топливе. ИЛ, М., 1963.
6. Глассмен И. — В кн.: Исследование ракетных двигателей на твердом топливе. ИЛ, М., 1963.
7. Гордон Д. А. — В кн.: Исследование ракетных двигателей на твердом топливе. ИЛ, М., 1963.
8. Дрюк, Гордон А., Кнайп Р. — В кн.: Гетерогенное горение. «Мир», М., 1967.
9. Диксон-Люис Г. — В кн.: Материалы IV симпозиума по вопросам горения и детонации волн. ИЛ, М., 1958.
10. Мачек А., Фридман Р., Сэмпл Дж. — В кн.: Гетерогенное горение. «Мир», М., 1967.
11. Маркштейн. — Ракетная техника и космонавтика, 1963, 3.
12. Флейсел В. М. и др. — В кн.: Исследование ракетных двигателей на твердом топливе. ИЛ, М., 1963.
13. Mellor A. M., Glassman I. Heterogeneous Combustion. Combustion Press. N.Y. — L., 1964, 159.
14. Smolenski D., Sewergauck M. — Biul. Woiskowoj Acad. Techn., 1963, 12, 4, 43; 5, 35.
15. Kuchl D. K. — AIAA J., 1965, 3, 12, 2239.
16. Rhein R. H. — Astronautic. Acta, 1965, 11, 5, 322.
17. Веселовский В. С., Орлеанская Г. Л. — Изв. АН СССР, ОТН, 1954, 4.
18. Францевич И. Н., Войтович Р. Ф., Лавренко В. А. Высоко-температурное окисление металлов и сплавов. Гостехиздат УССР, К., 1963.
19. Кубашевский О. И. и др. Термохимия в металлургии. ИЛ, М., 1954.
20. Кубашевский О. И., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. «Металлургия», М., 1965.
21. Улич Г. Г. — В кн.: Труды III Международного конгресса по коррозии металлов. «Мир», М., 1968.
22. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. Машгиз, М., 1962.
23. Gulbransen E. A., Ruka R. — J. Metals, 1950, 188, 1500—1508.
24. Gulbransen E. A., Wysong W. S. — J. Phys. Chem., 1947, 51, 1087—1183.
25. Gulbransen E. A., Andrew K. F. — J. Electrochem. Soc., 1950, 97, 383—395.
26. Pittsburgh International Conference on Surface Reaction Corrosion Publishing Co., Pittsburgh., 1948.
27. Gulbransen E. A., Andrew K. F. — J. Metals, 1950, 188, 586—599.
28. Gulbransen E. A., Andrew K. F. — J. Metals, 1949, 1.
29. Terem H. N. — Rev. Soc. Sci. univ. Istanbul, 1947, 12, 299—307.
30. Terem H. N. — Rev. fac. Sci. univ. Istanbul, 1948, 13, 147—159.
31. Terem H. N. — Rev. fac. Sci. univ. Istanbul, 1943, 8, 9—22.
32. Dunn J. S. — Proc. Roy. Soc. London, 1926, A 111, 203—209.

33. Материалы III Международного конгресса по коррозии металлов, I—IV. «Мир», М., 1968.

34. Годжелло М. Г. Взрывы промышленных пылей и их предупреждение. Изд-во м-ва коммунального хозяйства РСФСР, М., 1952.

35. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации газов. Изд-во АН СССР, М., 1944.

36. Поповкина Л. А., Фиалко М. Б. — В кн.: Труды и материалы УНИПРОМЕДЬ, Свердловск, 4, 1958.

37. Семенов Н. Н. Цепные реакции. Госхимиздат, Л., 1934.

38. Соколик А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. Изд-во АН СССР, М., 1960.

39. Степанов Е. М., Дьячков Б. Т. Ионизация в пламени и электрическом поле. «Металлургия», М., 1968.

40. Янтовский С. А. Самовоспламенение газов и паров. Изд-во ОТИ м-ва хим. пром-ти СССР, М., 1966.

41. Мануев Н. В. — Изв. вузов. Черная металлургия, 1962, 9.

42. Раковский В. С. — В кн.: Материалы IX всесоюзной конференции по порошковой металлургии. Рига, 1968.

43. Boyle A. R., Llewellyn F. J. — J. Chem. Soc. Ind., London, 1950, 69.

44. Hartmann I., Nagy J., Brown H. R. — U. S. Bur. Mines Report Invest., 1943, 3722.

45. Nusselt W. — Verfahrenstechnik Beih., 1924, VDI 68, 124—128.

46. Omori T. T., Orning A. — Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., 1950, 72, 591—597.

47. Предводителей А. С. — Изв. АН СССР, ОТН. Металлургия и топливо, 1953, 5.

48. Предводителей А. С. — В кн.: Труды Одесского госуниверситета, серия физических наук, 1960, 150, 7, 9—14.

49. Газодинамика и физика горения. Изд-во АН СССР, М., 1959.

50. Алексеева Т. И., Гуревич М. А., Озеров Е. С. — В кн.: Труды Ленинградского политехнического института, 1967, 280.

51. Гуревич М. А., Степанов А. М. — Физика горения и взрыва, 1968, 2.

52. Гуревич М. А., Сотниченко Б. И. — В кн.: Труды Ленинградского политехнического института, 1967, 280.

53. Гуревич М. А., Степанов А. М. — Физика горения и взрыва, 1968, 3.

54. Семенов Н. Н. — УФН, 1940, 35.

55. Семенов Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. Изд-во АН СССР, М., 1958.

56. Гейдон А. Г., Вольфгард Х. Г. Пламя, его структура, излучение и температура. Metallurgizdat, М., 1959.

57. Иост В. Взрывы и горение в газах. ИЛ, М., 1952.

58. Кондратьев В. Н. Кинетика химических газовых реакций. Изд-во АН СССР, М., 1958.

59. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. «Мир», М., 1968.

60. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. Физматгиз, М., 1959.

61. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, М., 1949.

62. Нейман М. Б., Шушунов В. А. Кинетический метод физико-химического анализа. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1948.

63. Гетерогенное горение. «Мир», М., 1967.

64. Процессы горения. Физматгиз, М., 1961.

65. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения. ИЛ, М., 1959.

66. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. «Наука», М., 1967.

67. Хитрин Л. М. Физика горения и взрыва. Изд-во МГУ, М., 1957.

68. Шелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения. Изд-во АН СССР, М., 1963.
69. Щетинков Е. С. Физика горения газов. «Наука», М., 1965.
70. Гуревич М. А., Шаулов Ю. Х. — В кн.: Термодинамические исследования методов взрыва и расчеты процессов горения. Изд-во МГУ, М., 1955.
71. Гурвич Л. В., Хачкурузов Г. А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Изд-во АН СССР, М., 1962.
72. Данков П. Д., Кочетков А. А., Шишаков Н. А. — Известия АН СССР, 1942, 5.
73. Канторович Б. В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. Изд-во АН СССР, М., 1958.
74. Андреев К. К. Термодинамическое разложение и горение взрывчатых веществ. «Наука», М., 1966.
75. Аванесов Д. С. Практикум по физико-химическим испытаниям взрывчатых веществ. Оборонгиз, М., 1959.
76. Баум Ф. А. и др. Физика взрыва. Физматгиз, М., 1959.
77. Зельдович Я. Б., Компанеев А. С. Теория детонации. Гостехиздат, М., 1955.
78. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. «Наука», 1966.
79. Ланг А. Взрыв установки разделения воздуха. Перевод № 1675, ОНТИ, М., 1962.
80. Соколик А. С. — В кн.: Сгорание в транспортных двигателях. Изд-во АН СССР, М., 1951.
81. Шидловский А. А. — ЖПХ, 1946, 19, 4.
82. Шидловский А. А. Основы пиротехники. «Машиностроение», М., 1964.
83. Сплавы твердые металлокерамические и порошки металлические. Изд-во стандартов, М., 1967.
84. Федорченко И. М., Андриевский Р. А. Основы порошковой металлургии. АН УССР, К., 1963.
85. Sloan U. A. Symposium on Powder Metallurgy. London, 1956, 44.
86. Jacobson M., Cooper A. K. and Nagy J. — Report of Investigation Bureau of Mines, V. S. GPO, 1964, 6516.
87. Helwig N. — Staub, 1966, 2.
88. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. Изд-во АН СССР, М., 1955.
89. Клячко Л. С. Отопление и вентиляция, 1934, 4.
90. Розенбаум Р. Б., Тодес О. М. — ДАН СССР, 1957, 115, 3.
91. Лященко П. В. Гравитационные методы обогащения, Госоптехиздат, 1940.
92. Минц Д. М., Шуберт С. А. Гидравлика зернистых материалов. Изд-во Минкомхоз, М., 1955.
93. Горошко В. Д., Розенбаум Р. Б., Тодес О. М. — Нефть и газ, 1958, 1.
94. Гупало Ю. П. — ИФЖ, 2, 1962.
95. Горбис З. Р. Теплообмен дисперсных сквозных потоков. «Энергия», М.—Л., 1964.
96. Розенбаум Р. Б. — Записки Ленинградского горного института, 1958, 36, 3.
97. Бадеев Ю. С. Обогащение руд, 1961, 4.
98. Цибаровский Я. Процессы химической технологии. Госхимиздат, М., 1958.
99. Дорендорф К. К., Сидельковский Л. Н. — Цветные металлы, 1969, 8.
100. Торский П. Н. и др. Обеспыливание угольных шахт. Углетехиздат, М., 1956.

101. Hamilton R. J. — N. C. B. Central Research Establishment Report, 1952, 137.
102. Daves J., Slak A. — SMRE, 1954, 104.
103. Witzmann H. — Staub, 1962, 22, 12.
104. Cartwright J. — Ann. occup. Hyg., 1962, 5, 163.
105. Фигуровский И. А. Седиментационный анализ. Изд-во АН СССР, М., 1948.
106. Прандтль Л. — Гидроаэромеханика. ИЛ, М., 1949.
107. Hinkle — J. Appl. Phys. 1954, 9.
108. Климанов А. Д. — В кн.: Сборник научных трудов МГИ, 16, 1956.
109. Фукс Н. А. Успехи механики аэрозолей. Изд-во АН СССР, М., 1961.
110. Андреев С. Е., Товаров В. В., Петров В. А. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. Металлургиздат, М., 1959.
111. Gebelein H. — Chem. Ingr. Techn., 1956, 28, 12.
112. Ballet W. — Chem. Ingr. Techn., 1954, 26, 2.
113. Самсонов В. Т. — В кн.: Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, 3. Профиздат, М., 1964.
114. Кауе В. Н. — Staub, 1964, 3, 100.
115. Савина А. А. — В кн.: Научн. работы институтов охраны труда ВЦСПС, 3. Профиздат, М., 1965, 27.
116. Колмогоров А. Н. — ДАН СССР, 1941, 31, 2, 99.
117. Фейгин Л. А., Эдельман Л. И., Мазин И. П. — В кн.: Труды ВНИИНСМ, 1, 1959.
118. Понамарев И. И. — В кн.: Труды НАМИ, 42, 1961.
119. Fay G., Zselew B. — Energietechnik, 1961, 11, 518.
120. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. ИЛ, М., 1956.
121. Гордон Г. М., Пейсахов И. Л. Контроль пылеулавливающих установок. Metallurgizdat, М., 1961.
122. Петрянов-Соколов И. В. и др. Аналитические аэрозольные фильтры АФА. Патент СССР, кл. 42/1, 4/15, № 138768, Бюллетень изобретений, 1961, 11.
123. Оборудование, применяемое при комплексном обеспыливании рудников и шахт. «Недра», М., 1964.
124. Измайлов Г. А. — В кн.: Применение радиоактивных изотопов и ядерных излучений в промышленности, 14, ЦИТЭИ, М., 1961.
125. Dresna H., Fischotter R. — VDI-Zeitschrift, 1964, 106, 24, 1191.
126. Маликов В. Т. — В кн.: Материалы XII Пленума комиссии АН УССР по борьбе с силикозом. Изд-во АН УССР, М., 1961.
127. Feifel E. — Staub, 1959, 5, 139.
128. Prochazka R. — Mod. Unfallverhütung, 1962, 6, 17.
129. Prochazka R. — Staub, 1964, 9, 353.
130. Измайлов Г. А. Приборостроение, 1959, 7.
131. Анисимов С. С., Дараган-Сущов В. И. — Горный журнал, 1960, 6, 74.
132. Auy A., Venarie M. — Staub, 1964, 9, 343.
133. Ivers E. I. — DIN-Mitteilungen, 1960, 5, 39.
134. Deischner H. — ASTM. Spec. Techn. Pub., 1958, 234.
135. Gardiner J. A. — Instrument Practice, 1968, 22, 1, 50.
136. Staub, 1964, 4, 159.
137. Gillings D. W. — Instrument Practice, 1955, 8, 763; 7, 886.
138. Roberts F., Joung I. Z. — Nature, 1962, 169, 963.
139. Edmundson I. S. — Nature, 1966, 212, 5069, 1450; Staub, 1967, 6, 287.
140. Zeidler G. — Arch. Techn. Messen, 1964, 338.

141. Радушкевич Л. В., Леонтьев Е. А., Колганов В. А. — ЖФХ, 1961, 35, 5, 1153.
142. Ромашев Г. И. — В кн.: Вопросы очистки воздуха от пыли. ВНИТО ТОиВ, М., 1940.
143. Коузов П. А. — В кн.: Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, 2. Профиздат, М., 1964.
144. Kast W. — Staub, 1960, 7, 205.
145. Schilling K. — Staub, 1962, 3, 129.
146. Pretorius S. T., Mandersloot W. G. B. — Powder Technology, 1967, 1, 23.
147. Battel W. KorngroBenmeBtechnik, Springer-Verlag K. G. Berlin, 1959.
148. Коузов П. А. и др. — В кн.: Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, 2. Профиздат, М., 1964, 32.
149. John R., Ramapujam M. — Staub, 1963, 3, 269.
150. Чергорян В. М. и др. — Порошковая металлургия, 1965, 9, 95.
151. Сердюков И. В., Гречнюк Р. Л. — Порошковая металлургия, 1967, 4, 86.
152. Kotere J. и др. — Kolloid, Z., 1967, 219, 1, 90.
153. Карелин Б. А., Луцкий В. К. Методы и аппаратура для изменения размеров частиц. «Цветметинформация», М., 1966.
154. Смолякова С. И. — В кн.: Труды МакНИИ, 1963, 15. Госгортехиздат, М., 240.
155. Venarie M. — Staub, 1964, 1, 23.
156. Venarie M. — Staub, 1962, 3, 118.
157. Abraham R. P. — Mining and Minerals Engineering. June, 1961, 391.
158. Preining O. — Staub, 1962, 3, 129.
159. Stöber W., Zessack U. — Staub, 1964, 8, 295.
160. Muschelkrantz — VDI-Z., 1967, 109, 17, 757.
161. Эдельман Л. И., Ходаков Г. С. — Коллоидный журнал, 1964, 3, 380.
162. Grows M. — Brit. Chem. Engng., 1964, 11, 742.
163. Langer G. и др. — Int. J. Air Water Pollution, 1964, 3/4, 167.
164. Schall F. — Ziegelindustrie, 1963, 18, 628.
165. Irani R. R., Callins C. F. Particle size Measurement, Interpretation and Application, 1963.
166. Simeček J. — Staub, 1966, 26, 9, 372; 1967, 27, 6, 282.
167. Jankowski B. — Silikattechn., 1966, 7, 212.
168. Mathiak H. — Erzmetall, 1968, 21, 2, 70.
169. Самсонов В. Т. — В кн.: Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, 4. Профиздат, М., 1964, 23.
170. Товаров В. В. — Заводская лаборатория, 1953, 5, 620.
171. Дерягин Б. В. — Заводская лаборатория, 1951, 3, 324.
172. Дерягин Б. В. — Определение удельной поверхности порошкообразных тел по сопротивлению фильтрации разреженного воздуха. Изд-во АН СССР, М., 1957.
173. Schlosser E. G. — Chemie Ingr. Techn., 1959, 12, 399.
174. Брунауер С. — Адсорбция газов и паров, 1. ГИИЛ, М., 1948.
175. Эммет П. — В кн.: Катализ. ИЛ, М., 1955, 328.
176. Соминский Д. С., Ходаков Г. С. Прибор для определения удельных поверхностей дисперсных материалов методом низкотемпературной адсорбции азота. ВНИИТИСМ научн. сообщение, 29. Промстройиздат, М., 1957.
177. Темкин М. И. — ЖФХ, 1955, 9.
178. Sandstede G., Robens E. — Chemie Ingr. Techn., 1960, 6, 413.
179. Perkin-Elmer Corp. Instrument Div. Sorptometer, mod. 212, Norholm (Comi), 1961 (USA).

180. Hausen N. — Chem. Labor und Betrieb, 1965, 1, 11.  
181. Поспехов Д. А. — ЖПХ, 1949, 12, 1, 5.  
182. Hartmann I. — Ind. Eng. Chem., 1948, 40, 4.  
183. Гост 2040-43. Составы пиротехнические. Определение температур самовоспламенения.  
184. Пожарная опасность веществ и материалов. Справочник под общей редакцией И. В. Рябова. Изд-во литературы по строительству, М., 1966.  
185. Арабей Б. Г., Салибеков С. Е., Левинский Ю. В. — Порошковая металлургия, 1964, 3, 109—113.  
186. Selle H., Zehr J. — Berufsgenossenschaft, 1955, 91—96.  
187. VDE 0165/9.57. Vorschriften für die Errichtung elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Betriebsstätten, VDE-Verlag, 1957.  
188. Loison R. — PACT 6, 1952, 1, 8—11.  
189. Andersen H. C. und Belz L. H. — Rev. sci. Instr., 1953, 24, 10, 1004.  
190. Hanel H. — Die Technik, 1956, 11.  
191. Dennstedt — Z. angew. Chemie, 1925.  
192. Leuschke G. — Staub, 1966, 2, 49—56.  
193. Dorsett H. G. a. o. — U. S. Dept., Bureau of mines., Rep. Inv., 1960, 5624.  
194. Злобинский Б. М. Охрана труда в металлургии. «Металлургия», М., 1968.  
195. Курнаков Н. С. Собрание избранных работ, 1. ОНТИ, Л., 1938.  
196. Арабей Б. Г., Левинский Ю. В., Салибеков С. Е. — Порошковая металлургия, 1964, 6, 110—113.  
197. Соколов Н. И. — Пожарное дело, 1958, 10, 7.  
198. Рыхтер Э. В., Загуляев М. А., Картышев А. А. — Водоснабжение и санитарная техника, 1957, 3.  
199. Boyle A. R.; Llewellyn F. J. — J. Soc. Chem. Ind., 1950, 69, 173—181.  
200. Boyle A. R., Llewellyn F. J. — J. Soc. Chem. Ind., 1947, 66, 99.  
201. Веревкин В. Н., Горшков В. И., Бондарь В. А. — В кн.: Проблемы горения и тушения. ВНИИПО МООП СССР. М., 1968.  
202. Vitall — Annales des mines, 1875, 7, 7, 180.  
203. Weber R. — Verh. Ver. z. Beforderung d. Gewerbefleißes, 1878, 57, 83.  
204. Stockmeier H. — Z. Untersuch. Nähr. u. Genussm., 1899, 2, 49.  
205. Trostel L. I. and Frevert H. W. — Chem. Metall. Eng., 1924, 30, 141—146.  
206. Bauer G. — Z. Ges. Schiess. u. Sprengstoffw., 1918, 13, 272—273.  
207. Jorissen W. a. o. — Rec. Trav. chim. Pays-Bas, 1933, 52, 403.  
208. Пейрик Х. И. Исследование воспламеняемости бинарных сплавов никеля с алюминием и титаном. Канд. дисс. МИСиС. М., 1967.  
209. Vauer W. D. — ASTM Bulletin, 1959, 10, 34.  
210. Fuhrman and Kottgen. — Z. Phys. Chemie, 1934, 169, 388.  
211. Kislig F. — Beiträge zur Kenntnis von Staubblammen. Mitteilungen der vereiningungskantonal-Schweizerischer Feuerversicherungsanstalten, 1950, 5.  
212. Bauer G. — Z. angew. Chemie, 1917, 30, 329.  
213. Gliwitsky W. — Jahresberichte der Chemische-Technischen Reichsanstalt Weinheim, VDI, Z. 1936, 80, 687; 1938, 59, 1149.  
214. Таубкин С. И. и др. Временная инструкция по определению нижнего предела воспламеняемости (взрываемости) аэрозвеси твердых веществ. ЦНИИПО МООП РСФСР, М., 1966.  
215. Brown K. C., Essenhigh R. H. — SMRE, 1959, 165, 3—23.  
216. Смелков Г. И., Фетисов П. А., Веревкин В. Н. Временная инструкция по определению минимальной энергии зажигания аэрозвеси твердых веществ (№ 22—67), ВНИИПО МООП СССР. М., 1968.



217. Кривицкий М. Д. Исследование и разработка методов и приборов контроля пылевзрывобезопасности угольных шахт. МакНИИ, 1965.
218. Mason R. B. and Taylor C. S. — *Ind. Engng. Chem.*, 1937, 29, 621.
219. Hartmann I. — U. S. Dept., Bureau of mines Rep. Inv. 1943, 3722.
220. Metzner H. und Beck G. — *Bergbautechnik*, 1968, 1, 45—49.
221. Clement J. K. and Lawrence J. N. — U. S. Bureau of mines, Techn. Paper, 1917, 141, 27.
222. Schwab R. F., Othmer D. F. — *Chem. Proc. Ing.*, 1964, 4.
223. Helwig N. — *Staub*, 1967, 8, 349.
224. Пейрик Х. И. — Изв. ВУЗов. Цветная металлургия, 1967, 6.
225. Иоффе В. Г. — Изв. ВУЗов. Цветная металлургия, 1964, 3.
226. Недин В. В., Нейков О. Д. Современные методы исследования пыли. «Недра», М., 1967.
227. Davies C., Aulward H., Leassy D. — *Arch. Ind. Hyg. Occ. med.*, 1951, 4, 354.
228. Parker H., Stevens W. — *A. I. Ch. E. Journal*, 1958, 3, 314.
229. Essenhigh R. H. — SMRE, R. R. HMSO, London, 1960, 188 (May).
230. Скочинский А. А. Рудничная атмосфера. ОНТИ, М., 1933.
231. Beyersdorfer P. Staubexplosionen. Verlag v. T. Steinkopff. Dresden und Leipzig, 1925.
232. Zehr J. — *Staub*, 1959, 19, 5, 204.
233. Hanel H. — *Energietchnik*, 1956, 6, 538.
234. Brunzel N. — *Mitt. VGB*, 1956, 42, 179.
235. Cybyski W. — *Chem. Abstr.*, 1956, 50.
236. Selle H., Zehr J. — *Staub*, 1954, 38, 583.
237. Selle H. — *VFDB-Ztschr.*, 1954, 1, 13.
238. Fischer K. — *Glückauf*, 1955, 91, 307.
239. Иоффе В. Г. — Порошковая металлургия, 1968, 3.
240. *Mechanical Engineers Handbook*, 1958, 7—44.
241. Поярков В. Г., Попов Е. И. — В кн.: Материалы VII Межвузовской конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Издание Одесского университета, 1967.
242. Мануев Н. В., Попов Е. И., Поярков В. Г. — В кн.: Материалы VII Межвузовской конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Издание Одесского университета, 1967.
243. Попов Е. И. — Порошковая металлургия, 1968, 12.
244. Jackel G. — *Z. Techn. Physik*, 1924, 5, 67—78.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава I. Общие сведения о горении металлических порошков в газовой среде . . . . .</b>	<b>5</b>
Механизм окисления . . . . .	5
Искрение и вспышка . . . . .	7
Воспламенение . . . . .	8
Энергия воспламенения . . . . .	9
Время разогрева частицы до ее воспламенения (период индукции) . . . . .	10
Механизм воспламенения металлической частицы . . . . .	12
Теоретические исследования воспламенения . . . . .	13
Горение . . . . .	16
Механизм горения . . . . .	18
Распространение горения и условия перехода горения в детонацию . . . . .	21
<b>Глава II. Некоторые сведения о физических свойствах металлических порошков и методы их исследования . . . . .</b>	<b>24</b>
Химический состав порошков . . . . .	25
Краткие сведения о физических свойствах порошков и газодисперсных систем . . . . .	27
Дисперсный состав порошков . . . . .	39
Методы исследования порошков и твердой фазы газодисперсных систем . . . . .	45
Отбор проб твердой фазы из газодисперсных систем . . . . .	46
Определение концентрации взвешенных в газе частиц . . . . .	52
Определение дисперсного состава . . . . .	56
Определение удельной поверхности порошков . . . . .	67
<b>Глава III. Характеристики взрываемости металлических порошков и методы их исследования . . . . .</b>	<b>72</b>
Источники воспламенения . . . . .	74
Методы исследования пиропорности порошков . . . . .	75
Температура тления . . . . .	77
Температура самонагрева и самовоспламенения порошков . . . . .	78
Температура воспламенения . . . . .	79
Минимальная энергия воспламенения . . . . .	81
Общие сведения о методах исследования взрываемости порошков . . . . .	81
Установки ИПМ АН УССР для исследования характеристик взрываемости порошков . . . . .	84
Описание установок . . . . .	85
Выбор конструкции распылителя и режимов распыления . . . . .	91
Исследование распределения концентрации в модели взрывной камеры . . . . .	95
Выбор воспламенителя . . . . .	98
Исследование влияния начального давления газа на параметры взрыва . . . . .	101
Давление, развиваемое при взрыве . . . . .	104
Нижний концентрационный предел взрываемости . . . . .	109
Верхний концентрационный предел взрываемости . . . . .	111
Минимальная температура и энергия воспламенения распыленных порошков . . . . .	117

Влияние крупности частиц на параметры взрыва . . .	121
Исследование влияния степени окисленности порошков на их взрываемость . . . . .	125
Влияние защитной газовой среды с различным содержа- нием кислорода на взрываемость порошков . . .	127
Сводные данные о пирофорности и взрываемости ме- таллических порошков . . . . .	128
Литература . . . . .	132

Валентин Васильевич Недин, Олег Доминанович Нейков,  
Анатолий Григорьевич Алексеев,  
Владимир Алексеевич Кривцов.

### **Взрывоопасность металлических порошков**

*Печатается по постановлению ученого совета Института проблем  
материаловедения АН УССР*

Редактор *Н. А. Ласкавая*  
Художник *Н. В. Нестеренко*  
Художественный редактор *И. В. Козий*  
Технический редактор *Е. Б. Шамраевский*  
Корректоры *Е. А. Михалец, Л. М. Тищенко*

Сдано в набор 12. V 1970 г. Подписано к печати 26. I 1971 г.  
БФ 05146. Зак. № 1468. Изд. № 152. Тираж 2200. Бумага  
№ 2, 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печ. физ. листов 8,75 + 3 вкл. Условн. печ.  
листов 9,125. Учетно-издат. листов 9,9. Цена 1 руб. 16 коп.

Издательство «Наукова думка», Киев, Репина, 3.

Областная книжная типография Львовского областного управ-  
ления по печати, Львов, Стефаника, 11.

1 руб. 16 коп.

ВЗРЬИВООПАСНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

„НАУКОВА ДУМКА“