

Abstract

The article suggests the technique of diagnosis of biological objects by means of infrared radiometry. The principles of thermal imaging techniques for diagnosis of thermal fields on the surface of the body were considered. A solution of the equations of heat transfer from the depth to the surface of biological objects is given. The efficiency of the thermal imaging examinations at rapid control was shown. The main factors, influencing the distortion of the results were studied. A technique for damages calculation was worked out. The basic algorithms for computer processing of the results were singled out. There is an examination of problems of layings, false thermoanomalies, thermal spots, which appear at the transcript of obtained thermograms. In the course of the examination, the effects of preliminary loading on the results were studied. A theoretical model of the influence of off-site sources of infrared radiation on the test results was suggested. This model was tested and tried-out in practice. The disorders in the life activity of studied objects were discovered. The various diseases were revealed by the method of infrared radiometry. Main examples of typical thermoimages, corresponding to real disorders, as well as false layings, were given. These data were used to create the databases of thermograms of various diseases. The research is a subject of concern for practical usage at the thermal control of the human body

Keywords: infrared radiometry, thermogram, thermoanomalies, surface of the human body

Розглянуто деякі закономірності електризації гранул ВР у процесі заряджання свердловин і шпурів гранулярними ВР. При цьому врахована кристалічна будова гранул та її вплив на процес руйнування. Показано, що роботи сил тертя достатньо для руйнування гранул та їх електризації

Ключові слова: гранула, диполь, енергія дисоціації, поляризаційна сила, електризація

Рассмотрены некоторые закономерности электризации гранул ВВ в процессе заряджания скважин и шпуров гранулярными ВВ. При этом учтено кристаллическое строение гранул и его влияние на процесс разрушения. Показано, что работы сил трения достаточно для разрушения гранул и их электризации

Ключевые слова: гранула, диполь, энергия диссоциации, поляризационная сила, электризация

УДК 621.88.087(03)

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ПРИ ЗАРЯЖАНИИ СКВАЖИН И ШПУРОВ ГРАНУЛЯРНЫМИ ВЗРЫВЧАТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

А. А. Гурин

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*
Контактный тел.: (0564) 64-01-40

Ю. А. Гурин

Кандидат технических наук, доцент*

И. С. Радченко

Кандидат физико-математических наук, доцент**
Контактный тел.: (0564) 71-87-31, 067-271-46-90

И. Б. Степанкина

Старший преподаватель**
Контактный тел.: (0564) 71-70-97, 097-599-83-47
E-mail: irischca.s@mail.ru

*Кафедра рудничной аэрологии и охраны труда
**Кафедра теоретической и прикладной механики

Криворожский национальный университет
ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, Украина, 50027

1. Проблема и ее связь с научными и прикладными задачами

К основным процессам, которые приводят к образованию заряда на частицах пыли, относится прямая

ионизация, статическая электризация, столкновение с ионами или ионными кластерами (в присутствии внешнего электрического поля или без него), а также ионизация частицы электромагнитным излучением (ультрафиолетовым, видимым или гамма-излучени-

ем). Перечисленные процессы могут протекать как совместно, так и по отдельности.

О прямой ионизации частиц к настоящему времени известно очень мало. Считается, что образование заряда на частицах происходит в основном вследствие захвата ими ионов из воздуха, а не путем прямой ионизации.

В процессах электризации важную роль играют электролитические эффекты. В этом случае жидкие растворы с высокой диэлектрической проницаемостью обмениваются ионами с металлическими или другими твердыми поверхностями. Например, капли жидкости с большой диэлектрической проницаемостью, стекающие с металла, уносят с собой положительный заряд. Эти капли отталкиваются друг от друга, так как захватывают заряды одного знака.

В процессе контактной электризации электроны с чистых сухих поверхностей различных металлов, которые находятся в соприкосновении, перемещаются вглубь металла с более низкой работой выхода электрона. По своей природе это чисто электронный процесс. Для его описания необходимо учитывать энергетические состояния электронов, т.е. в конечном счете, кристаллическое строение вещества.

В настоящее время увеличился интерес к «электричеству от трения» - так называемому статическому электричеству. Главная причина такого интереса – опасные явления, которые происходят при электризации тел. Давно известны вредные действия статического электричества. Например, кожаные и прорезиненные ремни электризуются на вращающихся шкивах и во многих случаях становятся источниками искрового разряда. Подобное явление наблюдается при зарядании скважин и шпуров гранулированными взрывчатыми веществами. Искровой разряд особенно опасен, если в воздухе висит мелкая горючая пыль (например, пыль взрывчатых веществ, мука). Проскочившая от наэлектризованных тел искра может вызвать взрыв и пожар.

Явления электризации соприкосновением, скольжением или трением изучаются уже давно. Однако до сих пор не существует строгой общепринятой теории этих явлений. Они до конца не поняты и не подтверждены математическим анализом.

К настоящему времени известно, что электризация представляет собой процесс разделения существующих в атомах зарядов и перенос отрицательных зарядов, или электронов, на одно тело, а положительных зарядов – на другое тело. Такое разделение зарядов происходит при разрушении кристаллической решетки в твердых телах, при образовании капель жидкости, при деформации некоторых полимеров и при некоторых других явлениях.

В данной работе рассмотрены некоторые вопросы электризации тел с учетом их кристаллического строения.

2. Изложение материала

Закон сил (поле сил), действующий между атомами в твердом теле, является таким же, как и между атомами, находящимися в газообразной фазе. Основное отличие твердого состояния от газообразного заклю-

чается не в ином виде закона взаимодействия между атомами. Оно в том, что если в газе атомы большую часть времени проводят на значительном расстоянии друг от друга, где силы взаимодействия малы, то в конденсированной фазе атомы всегда находятся очень близко друг к другу, где эти силы довольно интенсивны.

На расстоянии $r=d_0$ силы отталкивания и притяжения между атомами равны (суммарная сила равна нулю). Следовательно, потенциальная энергия взаимодействия между атомами имеет минимальное значение. Очевидно, расстояние d_0 можно связать с расстоянием между ближайшими соседними атомами в кристалле, т.е. с равновесным расстоянием между этими атомами. Если играют роль только силы взаимодействия между ближайшими соседними атомами (такое явление наблюдается в случае твердого состояния благородных газов), то расстояние между ближайшими соседями равно расстоянию, на котором потенциальная энергия имеет минимум. Однако если необходимо учитывать дальнедействующие силы взаимодействия между соседними, а не только ближайшими соседними атомами, как, например, в ионных кристаллах, то равновесное расстояние несколько изменится.

Аналитическое выражение для потенциальной энергии было предложено Г.Ми. Потенциал Ми имеет вид суммы двух степенных функций:

$$U(r) = -\frac{A}{r^m} + \frac{B}{r^n}, \quad n > m. \quad (1)$$

Постоянные A и B положительны. Условие $n > m$ необходимо для того, чтобы положительный член был преобладающим (стремялся к бесконечности быстрее) при стремлении r к нулю и стремился к нулю (при стремлении r к бесконечности) быстрее, чем отрицательный член. Это обеспечивает появление сил притяжения при больших значениях r и сил отталкивания при малых r .

Далее рассмотрим наиболее простой случай – ионный кристалл типа NaCl, который состоит из ионов Na^+ и Cl^- . Следовательно, притяжение между ионами Na^+ и Cl^- представляет собой просто электростатическое кулоновское притяжение. Таким образом, для одновалентных ионных кристаллов мы имеем (в системе СГС):

$$A = e^2; \quad m = 1, \quad (2)$$

где $e = 4,803 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ = $1,602 \cdot 10^{-19}$ К – заряд электрона.

В системе СИ

$$A = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0},$$

где $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Предположим, что потенциальная энергия взаимодействия в молекуле парообразного NaCl описывается равенством (1), и вычислим разность энергий между стационарным равновесным состоянием молекулы (в этом состоянии энергия молекулы минимальна) и состоянием, в котором два иона разделены бесконечно

большим расстоянием (рис. 1). Эту разность энергий, которую в физике называют энергией диссоциации D молекулы, можно измерить экспериментально.

В действительности можно построить теорию, вообще говоря, и для других типов связи атомов в кристаллах, однако она оказывается наиболее плодотворной для случая именно ионной связи.

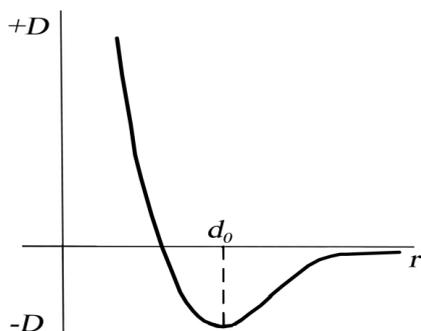


Рис. 1. Зависимость потенциальной энергии от расстояния между атомами в кристалле (потенциал Г.Ми)

Вычислим для потенциала Ми (формула (1)) значение $U(d_0)$. Для этого выразим неизвестный параметр B через параметр d_0 , который, в принципе, можно определить экспериментально. Функция U имеет минимум при $r=d_0$ (см. рис. 1), поэтому

$$\left. \frac{dU}{dr} \right|_{r=d_0} = 0.$$

Дифференцируя выражение (1) по r и приравнявая результат нулю, в точке $r=d_0$ получим

$$\frac{mA}{d_0^{m+1}} - \frac{nB}{d_0^{n-1}} = 0,$$

откуда

$$B = \frac{m}{n} A d_0^{n-m}. \quad (3)$$

С учетом последнего равенства перепишем выражение (1) в следующем виде:

$$U(r) = \frac{A}{d_0^m} \left[\left(\frac{d_0}{r} \right)^m - \frac{m}{n} \left(\frac{d_0}{r} \right)^n \right]. \quad (4)$$

Выражение (4) содержит одну постоянную d_0 , которую можно измерить. Эта постоянная определяет расстояние между центрами ионов исследуемой молекулы. Следовательно, минимальное значение потенциальной энергии равно

$$U(d_0) = -\frac{A}{d_0^m} \left(1 - \frac{m}{n} \right). \quad (5)$$

Для одновалентной ионной двухатомной молекулы используем уравнение (2) и из (5) найдем:

$$U(d_0) = -\frac{e^2}{d_0} \left(1 - \frac{1}{n} \right). \quad (6)$$

В выражении (6) множитель $\frac{e^2}{d_0}$ определяет кулоновскую энергию притяжения, а множитель $\left(1 - \frac{1}{n} \right)$ учитывает наличие сил отталкивания. В таком случае энергия диссоциации молекулы равна $D = -U(d_0)$.

Численное значение величин d_0 и D можно получить из измеренного инфракрасного спектра паров NaCl. Экспериментальное значение $d_0 = 2,5 \cdot 10^{-8}$ см [1]. Из уравнения (6) для NaCl находим при $n=9$:

$$D = \frac{4,8^2 \cdot 10^{-20} \cdot 8}{2,5 \cdot 10^{-8} \cdot 9} = 8,1 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 8,1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 5,1 \text{ eV}.$$

Дальше вычислим энергию связи твердого состояния (твердого тела), т.е. ту энергию, которую необходимо сообщить кристаллу для того, чтобы разложить его на отдельные ионы, находящиеся далеко друг от друга. Энергию связи можно выражать через теплоту испарения твердого тела, энергию диссоциации кристалла (например, NaCl) и энергию ионизации атомов (например, Na и Cl). Эта энергия связана с разностью потенциальных энергий состояния, когда ионы находятся в их равновесных положениях и состоянии, когда они удалены друг от друга на бесконечно большое расстояние. В твердом теле для определения потенциальной энергии необходимо учитывать взаимодействие между ближайшими атомами. В этом случае выражение для потенциальной энергии взаимодействия данного иона со всеми другими ионами следует написать в следующем виде:

$$U_1(r) = \alpha \frac{A}{r^m} + \beta \frac{B}{r^n}, \quad (7)$$

где α и β – величины, которые учитывают взаимодействия со всеми соседями. Из физических соображений ясно, что их значения не должны сильно отличаться от единицы. Они могут быть точно рассчитаны для каждой данной кристаллической структуры. Обозначим через d равновесное расстояние между ионами в кристалле и продифференцируем равенство (7). При равновесном расстоянии $d=r$ эта производная равна нулю, т.е.

$$\left. \frac{dU_1}{dr} \right|_{r=d} = 0$$

и находим

$$\beta \cdot B = \alpha \frac{m}{n} \cdot A d^{n-m}. \quad (8)$$

Подставим это значение в уравнение (7) и найдем энергию взаимодействия данного иона со всеми другими ионами:

$$U_1(r) = -\alpha \frac{A}{d^m} \left[\left(\frac{d}{r} \right)^m - \frac{m}{n} \left(\frac{d}{r} \right)^n \right]. \quad (9)$$

Находим минимальное значение этой энергии:

$$U_1(d) = -\alpha \frac{A}{d^m} \left(1 - \frac{m}{n}\right). \tag{10}$$

Энергия связи на один моль равна

$$U = -N_0 \cdot U_1(d), \tag{11}$$

где $N_0 = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро.

Ввиду того, что в одном моле вещества имеется $2N_0$ молекул и ионов, нам необходимо ввести множитель $\frac{1}{2}$ для того, чтобы не учитывать энергию взаимодействия данной пары ионов два раза. В таком случае энергия связи равна:

$$U = \alpha N_0 \cdot \frac{A}{d^m} \left(1 - \frac{m}{n}\right). \tag{12}$$

Для одновалентного ионного кристалла, используя равенство (2), находим:

$$U = \alpha N_0 \cdot \frac{e^2}{d} \left(1 - \frac{1}{n}\right). \tag{13}$$

Как известно, постоянная α называется постоянной Маделунга. Ее можно определить формулой

$$\frac{\alpha}{R} = \sum \frac{(\pm)}{r_j}, \tag{14}$$

где r_j – расстояние иона с номером j от исходного; R – расстояние между соседними ионами. В работе [2] предложены довольно простые методы расчета постоянной Маделунга, в которых используются быстро сходящиеся ряды.

Некоторые типичные значения постоянной Маделунга, вычисленные для единичных зарядов ионов и относящиеся к расстояниям между ближайшими соседями, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения постоянной Маделунга для некоторых структур

| Структура | α |
|-------------------------|----------|
| Хлористый натрий (NaCl) | 1,747565 |
| Хлористый цезий (CsCl) | 1,762675 |
| Цинковая обманка (ZnO) | 1,6381 |

Подставим численные данные в формулу (13) и найдем энергию связи для кристалла. Например, для кристалла NaCl при $d = 2,81 \cdot 10^{-8}$ см мы получим значение $U = 184$ ккал/моль = $128,024 \cdot 10^{-20}$ Дж/молекула = $8,0$ эВ/молекула. Величина U , полученная в калориметрических измерениях, равна 183 ккал/моль, что довольно хорошо согласуется с вычисленным значением.

Рассмотрим движение гранулы NaCl по поверхности с коэффициентом трения $f = 0,1$. Масса такой сферической гранулы с $R = 2$ мм = $2 \cdot 10^{-3}$ м равна $m = 72,34 \cdot 10^{-6}$ кг, а работа сил трения $A = fmgS = 0,1 \cdot 72,34 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 = 72,34 \cdot 10^{-6}$ Дж. Следовательно, при движении такой гранулы работа сил трения сможет «оторвать» от гранулы $N = 5,63 \cdot 10^{13}$ молекул. Такая же картина наблюдается и при разрушении гранулы: атомы могут ионизироваться, и поверхность

оказывается заряженной. Энергия связи для других типов кристаллов может быть вычислена по методике, приведенной выше, а следовательно, и механизм заряжения будет подобным: та часть, от которой «оторвалось» больше электронов или отрицательных ионов остается заряженной положительно, другая же («оторванная») часть заряжена отрицательно.

Переизмельченные частицы гранулированных взрывчатых веществ (ВВ) с большой вероятностью являются заряженными. Эти частицы оседают на стенках шланга и, имея удельное сопротивление порядка $10^4 \div 10^{10}$ Ом·м, способствуют возникновению электризации.

Остановимся отдельно на особенностях широко используемых в настоящее время полупроводящих шлангов. Материал для их изготовления получают при добавлении к полиэтиленовой основе разного процентного содержания ацетиленовой сажи. Такие шланги имеют удельное сопротивление 10^2 Ом·м. Полупроводящие шланги имеют существенные недостатки:

- 1) неравномерная полупроводимость по длине;
- 2) высокая способность к истиранию;
- 3) нестойкость к соляровому маслу.

Следовательно, факторы, которые вызывают электризацию, взаимосвязаны. Скорость потока ВВ оказывает непосредственное влияние на их гранулометрический состав. При большей скорости увеличивается число столкновений между гранулами и количество переизмельченных частиц. Это изменяет характер контакта частиц с поверхностью – для малых частиц сцепление больше и они лучше оседают. Такое оседание происходит неравномерно по всей длине шланга. Поэтому наблюдается местное увеличение удельного сопротивления шланга.

Так как разрушение гранул происходит при соударениях, то при превозаряжении скорость потока не должна превышать 20 м/с и концентрация материала ВВ должна быть не выше 35 кг/м³. Такое разрушение гранул происходит и при ударе их об стенки шланга при его закруглении. Угол «изгиба» шланга не должен быть меньше 120° (радиус закругления более 0,5÷0,8 м).

При формировании заряда гранулированных ВВ в объеме скважины необходимо учитывать наличие прямого и обратного потоков, которые движутся в противоположных направлениях (рис. 2).

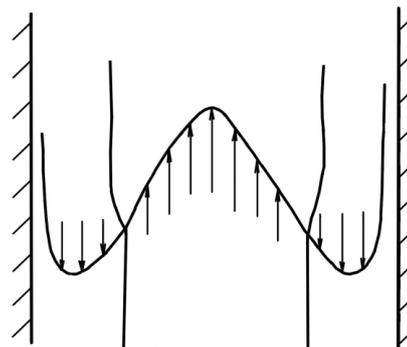


Рис. 2. Образование прямого и обратного потоков ВВ в скважине

Наличие заряда на частицах существенно изменяет взаимодействие между ними. Рассмотрим две проводящие сферические частицы, одна из которых несет положительный заряд, а вторая не заряжена (рис. 3).

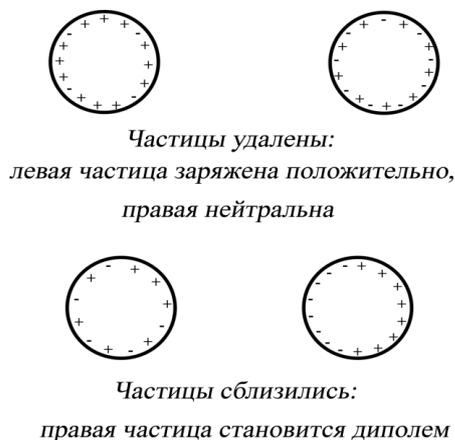


Рис. 3. Механизм перераспределения зарядов для проводящих частиц при их сближении под действием внешних сил

Если первая частица приблизится ко второй, ее положительный заряд притянет электроны второй частицы с удаленной от заряда части к ближней части (см. рис. 3). При этом образуется диполь с отрицательным зарядом, расположенным ближе к положительно заряженной частице, и между двумя частицами возникнет сила притяжения. Данная сила, которая также может возникать между заряженной частицей и незаряженной собирающей поверхностью и наоборот, в физике известна как поляризационная или индукционная сила. Появление этой силы обычно ведет к возрастанию осаждения заряженных частиц на любой поверхности, а также к захвату незаряженных частиц заряженной поверхностью. Наличие заряженных частиц или тел может значительно изменить траекторию движения других частиц. Как пример на рис. 4 показаны траектории частиц при обтекании ними незаряженного волокна.

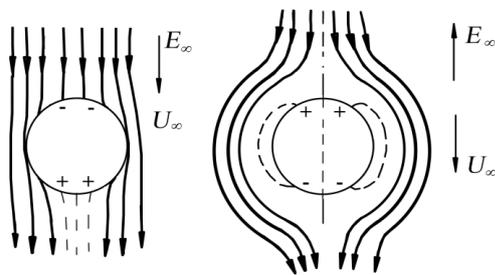


Рис. 4. Обтекание незаряженного волокна положительно заряженными частицами в электрическом поле

Следовательно, в настоящее время можно выделить следующие основные процессы, приводящие к образованию зарядов на гранулах.

1. Образование заряда на частицах в процессе их дробления или разрушения. При этом одна часть может иметь избыток электронов, а другая – их недостаток. В итоге первая часть гранулы окажется заряженной отрицательно, а вторая – положительно. Такое

дробление происходит при соударении гранул друг с другом или гранул со стенками зарядного шланга.

2. Образование заряда при трении, в результате чего гранулы приобретают заряд при контакте с металлами или с другими гранулами. Очевидно, что основной механизм такой электризации – отрыв электронов. Расчет, приведенный выше, показывает, что работы сил трения вполне хватает на такой отрыв. Величины зарядов частиц при взаимодействии между собой будут больше, чем с случае взаимодействия частиц с поверхностями.

В табл. 2, согласно данным работ [3], [4], приведен перечень материалов, которые получают тот или иной заряд при контакте.

Таблица 2

Предпочтительный знак приобретаемого материалом заряда при электризации трением

| Знак | Материал |
|------|----------|
| + | Асбест |
| - | Стекло |
| + | Кальцит |
| - | Кварц |
| + | Магний |
| - | Свинец |
| + | Гипс |
| - | Цинк |
| + | Медь |
| - | Серебро |
| + | Кремний |
| - | Сера |

Показанный здесь ряд по существу является трибоэлектрическим рядом, в котором предыдущее тело ряда электризуется положительно, а последующее – отрицательно. Например, в ряду Фарадея (мех, фланель, слоновая кость, перья, горный хрусталь, бумажная ткань, шелк, дерево, металлы, сера) электризуемые вещества расположены от плюса к минусу [3]. В ряде Гезехуса расположение диэлектриков характеризуется не только переходом от положительного электричества к отрицательному, но и уменьшением твердости в той же последовательности: алмаз (имеет твердость по шкале Мооса 10), топаз (8), горный хрусталь (7), стекло (5), слюда (4), сера (2), воск (1) [4]. Отметим, что для металлов в трибоэлектрическом ряду наблюдается возрастание твердости. Однако, у металлов механизм электризации трением иной, чем у диэлектриков. Электризацию металлов можно объяснить на основе контактной разности потенциалов.

Из табл. 2 следует, что если частицы кварца проходят через стеклянную трубку, то вследствие статической электризации заряд частиц будет отрицательным, а заряд трубки (стекло) положительным.

В случае, если имеющие высокую концентрацию взвеси взрывоопасных частиц пыли протекают через не заземленную трубку, на ней может накопиться значительный заряд того или иного знака, что приводит к искровому разряду и, в конечном итоге, к взрыву. При относительной влажности 50-60% и выше зарядка частиц протекает медленнее. Это можно объяснить образованием на частицах тонкого слоя воды. Если

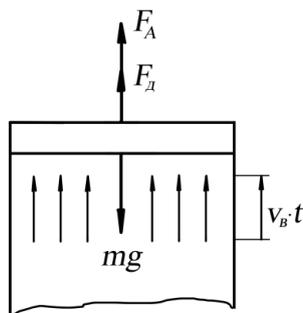
вода содержит достаточное количество растворенного проводящего вещества, то заряды не будут накапливаться. Следовательно, во взрывах пылевых систем важную роль играет не абсолютная, а относительная влажность, поскольку зарядку трением предотвращает не присутствие водяного пара, а осаждение воды на частицах.

При зарядании скважин и шпуров образовавшаяся пыль при взаимодействии гранул ВВ может выноситься из скважин или шпуров. Рассмотрим некоторые закономерности этого процесса.

Рассмотрим сферическую частицу радиуса R . На эту частицу в потоке воздуха, направленного вертикально вверх, действуют такие силы: сила тяжести

$$F_m = m_r g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_r \cdot g; \text{ сила Архимеда}$$

$$F_A = m_B g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_B \cdot g; \text{ сила давления со стороны движущегося вверх воздуха } F_d \text{ (рис. 5). Здесь мы обозначаем: } \rho_r \text{ - плотность вещества частиц (кг/м}^3\text{); } \rho_B \text{ - плотность воздуха (кг/м}^3\text{).}$$



v_B - скорость потока воздуха (м/с)

Рис. 5. Расчетная схема для вычисления сил, действующих на пылевую частицу в скважине

Для определения силы F_d воспользуемся теоремой об изменении количества движения потока воздуха, действующего на частицу:

$$m_B \cdot v_B = F_d \cdot t, \tag{15}$$

где v_B - скорость потока воздуха, м/с; t - время действия потока воздуха на частицу, с.

Так как $m_B = \pi R^2 \cdot v_B \cdot t \cdot \rho_B$, то из уравнения (15) находим:

$$F_d = \pi R^2 \cdot v_B^2 \cdot \rho_B. \tag{16}$$

В случае равновесия сил, действующих на частицу, имеем

$$m_r g = F_A + F_d;$$

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_r \cdot g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_B \cdot g + \pi R^2 \rho_B \cdot v_B^2. \tag{17}$$

Равенство (17) позволяет определить зависимость между скоростью потока воздуха v_B и параметрами выдуваемой пыли:

$$v_B^2 = \frac{4g(\rho_B - \rho) \cdot R}{3\rho_B}. \tag{18}$$

Из формулы (18) следует, что для частиц с большими R и ρ_r для выноса потребуется большая скорость потока.

Отметим, что частицы определенного состава и радиуса могут «поддерживаться» направленным вверх течением воздуха со скоростью в десятки м/с. Это может быть одной из причин образования серебристых облаков [5].

Следовательно, согласно формуле (18), мелкие частицы ВВ выносятся из скважины обратным потоком воздуха. Вследствие этого происходит концентрация крупных и мелких частиц в отдельных соприкасающихся областях. Так как крупные и мелкие частицы, образующиеся при дроблении гранул ВВ, заряжены разноименно, то наличие прямого и обратного потоков воздуха ведет к дополнительной электризации в объеме скважины при ее зарядании. Существуют области, в которых имеется электростатическое поле, величину напряженности которого определяют объемные заряды прямого и обратного потоков.

Изложенные здесь теоретические положения качественно согласуются с экспериментальными данными работы [6].

При уменьшении области, занимаемой обратным потоком, уменьшается и объем, занимаемый малыми частицами ВВ. Это приводит к уменьшению напряженности электростатического поля и к невозможности пробоя.

Особо необходимо остановиться на влиянии жидкости на процесс электризации гранул ВВ во время зарядания скважин. Благодаря действию поверхностных сил в верхнем слое жидкости с большой величиной диэлектрической проницаемости возрастает концентрация электронов и отрицательных ионов [7]. При распылении и барботаже этот слой разрушается, и образующиеся мелкие капли заряжаются в основном отрицательно, крупные же капли заряжаются либо положительно, либо отрицательно или остаются незаряженными. Как показывают эксперименты, большие частицы жидкости заряжены положительно чаще [7]. Растворенные соли обычно уменьшают величину заряда по сравнению с аэрозолями, которые образуются из чистых жидкостей. Обусловлено это тем, что растворы имеют меньшую диэлектрическую проницаемость. По мере уменьшения диэлектрической проницаемости этот эффект уменьшается до тех пор, пока не станет таким же, как и при распылении чистых углеводородов, когда образуются частицы, имеющие малый заряд. Исходя из этого смачивание гранул ВВ бишофитом является более эффективным по сравнению со смачиванием водой.

Вода является полярным диэлектриком. Ее молекулы имеют постоянный дипольный момент, который обусловлен асимметрией в расположении электронных облаков и ядер этих молекул. Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов в таких молекулах не совпадают, а находятся на практически постоянном расстоянии l . При растворении в воде солей, щелочей и кислот, каждая молекула которых также

представляет собой диполь, происходит распад таких молекул на ионы. Слой жидкой воды на грануле ВВ становится проводящим. Диэлектрическая проницаемость не сильно концентрированных растворов NaCl и NaJ в воде определяется соотношением:

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + 0,047\sqrt{n} - n),$$

где $\epsilon_0=81$ – диэлектрическая проницаемость «чистой» воды; $n \leq 0,5$ кмоль/м³ – концентрация раствора [8].

Электризацию жидкостей, в том числе и воды, можно объяснить наличием на поверхности двойного электрического слоя, который весь находится в самой жидкости. При дроблении жидкости этот слой находится на частицах. В таком случае заряд капель воды должен быть пропорциональным радиусу частиц.

Следовательно, увеличение дисперсности частиц ВВ приводит к увеличению электризации. Согласно экспериментальным данным работы [6], частицы аммиачной селитры с диаметром $(0 \div 0,25) \cdot 10^{-3}$ м имеют потенциал $U \sim 9$ кВ, а такие же частицы гранулита ~ 11 кВ.

При некоторых метеорологических условиях в карьерах и их бортах могут образоваться два вертикальных потока воздуха: вверх и вниз. При определенной их плотности в месте встречи образуется горизонтальный течение воздуха (рис. 6) [9].

Это течение может способствовать выносу пыли и придавать дополнительную скорость кускам породы, которые образуются при массовых взрывах в карьерах.

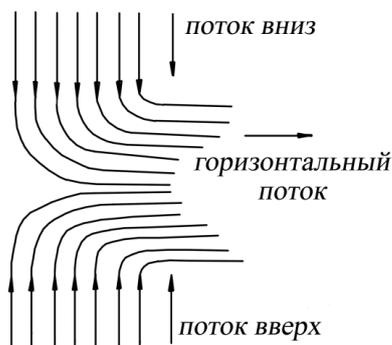


Рис. 6. Схема образования горизонтального потока воздуха

Такие мини горизонтальные потоки образуют при зарядании прямой и обратный потоки у устья скважины. В таких потоках аэрозольные частицы сталкиваются с ионами или ионными кластерами, захватывают их и таким образом становятся заряженными. Ионы или мелкие частички ВВ могут образовываться при разрушении их гранул.

Количество ионов, которые сталкиваются со сферической частицей диаметра d за единицу времени, равно

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N \cdot C}{4} (\pi d^2) = \frac{\pi d^2}{4} N \cdot C, \quad (19)$$

где N – количество ионов, которые находятся около частицы; C – среднеквадратичная скорость ионов.

Согласно кинетической теории концентрация ионов в потенциальном поле определяется равенством:

$$N = N_0 e^{\frac{V}{kT}}, \quad (20)$$

где N_0 – средняя концентрация ионов; V – потенциальная энергия иона на расстоянии R от центра частицы, которая содержит n элементарных зарядов того же знака:

$$V = -\frac{ne^2}{R}. \quad (21)$$

Следовательно, концентрация ионов на поверхности частицы равна

$$N = N_0 e^{\frac{-2ne^2}{dkT}}, \quad (22)$$

где k – постоянная Больцмана.

Подставим выражение (22) в (19) и найдем скорость изменения числа ионов:

$$\frac{dN}{dt} = C \cdot N_0 \frac{\pi}{4} d^2 e^{\frac{-2ne^2}{dkT}}. \quad (23)$$

Если предположить, что при $t=0$ частица не заряжена, то интегрирование выражения (23) дает

$$n = \frac{dkT}{2e^2} \ln \left(1 + \frac{\pi d C N_0 e^2}{2kT} t \right). \quad (24)$$

Для сферической частицы диаметром 10 мкм в среде с концентрацией ионов $N_0 = 5 \cdot 10^8$ см⁻³ при температуре $t = 20^0$ С при диффузной зарядке за время $t = 10$ с из формулы (22) находим $n \approx 14$, т.е. такая частица будет иметь 14 элементарных зарядов.

Похожая задача решается при исследовании осаждения капель воды или частиц. Столкновение частиц почти наверняка происходит из-за различий в скорости оседания капелек различного размера. В таком процессе могут участвовать только достаточно большие капельки.

Ленгмюр определяет эффективность захвата E как отношение сечения захвата к площади сечения захватывающей капли [10]. При больших числах Рейнольдса (Re)

$$E_h = \frac{K^2}{\left(K + \frac{1}{2}\right)^2}. \quad (25)$$

Для $Re \ll 1000$

$$E_e = \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\ln(2K)}{K - 1,214} \right)^{-2}. \quad (26)$$

Для промежуточных значений чисел Рейнольдса в той же работе [10] предложено следующее эмпирическое уравнение:

$$E = \frac{E_e + E_h \cdot \frac{Re}{60}}{1 + \frac{Re}{60}}, \quad (27)$$

где

$$K = \frac{L}{R} = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \rho v}{R \eta}, \quad (28)$$

здесь L – расстояние, которое капелька радиуса r пройдет в воздухе со скоростью v ; η – вязкость воздуха; R – радиус захватывающей капли.

В работе [11] показано, что существует критический размер капель, ниже которого слияние не происходит. Экспериментально Пикнет нашел, что капля не захватывает капельки меньше 2 мк, а капли радиуса 30 мк не захватывают капельки меньше 4 мк [11].

На рис. 7 показана эффективность столкновений капель воды радиуса r_1 с каплями радиуса r_2 по данным работы [12].

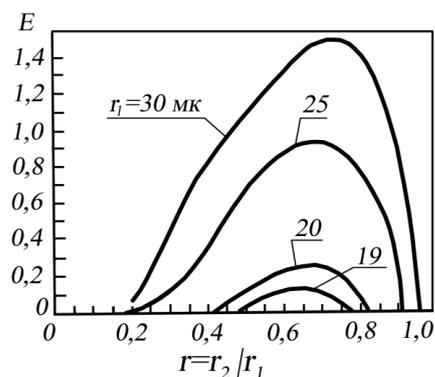


Рис. 7. Эффективность столкновений капель радиуса r_1 с каплями радиуса r_2 по данным Л.М.Хоккинг

Из этого рисунка видно, что если радиус большей капли равен 30 мк, то меньшая, более медленно опускающаяся капелька должна иметь радиус не меньше ~6 мк. Если большая капля имеет радиус ~20 мк, то меньшая должна иметь радиус приблизительно 8 мк. Если меньшая капелька имеет радиус, не превышающий критического значения, то она не столкнется с более крупной. Она такую каплю «обойдет стороной». Вероятно, более крупные капли первоначально об-

разуются при конденсации на больших гигроскопических ядрах.

Другая проблема – это захват твердых не смачиваемых частиц пыли крупными каплями, который происходит вследствие различия скоростей оседания. Эти частицы захватываются с меньшей эффективностью, чем капельки, которые способны сливаться с захватывающей их каплей [13].

Этот вопрос теоретически подробно исследован Пембертоном [14].

3. Выводы и рекомендации

1. Основными процессами, ведущими к образованию электрического заряда при пневмотранспортировании гранулированных ВВ, является разрушение гранул, трение гранул и пылинок между собой и о стенки зарядного шланга и др. Перечисленные процессы могут протекать как по отдельности, так и совместно в зависимости от конкретных условий и способа зарядания, состава ВВ и др., поэтому управлять ими довольно сложно.

2. При зарядании скважины образуются прямой и обратный потоки, в которых находятся частицы ВВ разных размеров. Это приводит к возникновению областей, имеющих разноименные заряды и большую разность потенциалов. Поэтому всегда существует «критическая» скорость зарядания, зависящая от физико-химических свойств гранул ВВ.

3. Известные рекомендации по предупреждению электризации (смачивание водой гранул ВВ, заземление зарядных установок и т.п.) не гарантируют полной безопасности работ при пневмозарядании скважин и шпуров гранулированными ВВ. При дроблении воды капли имеют заряд. Способность капель жидкости приобретать заряд при дроблении зависит от величины ее диэлектрической проницаемости. И в этом отношении бишофит более предпочтителен, чем вода.

4. Образующаяся во время зарядания скважин и шпуров пыль при наличии потоков «вниз» и «вверх» и при образовании горизонтального потока в результате их встречи может выноситься на большие расстояния.

Литература

1. Бабушкин А.А., Бажулин П.А., Королев Ф.А., Левшин А.В., Прокофьев В.К., Стриганов А.Р. Методы спектрального анализа. – М.: Издательство Московского университета, 1962. – 509 с.
2. Frank F.C. Phil. Mag. – 1950. – V. 41. – P. 1287.
3. Miller J.G., Heinemann H. Science. – 1948. – V. 107. – P. 144-151.
4. Miller F.C., Loeb L.B. J. Appl. Phys. – 1951. – V. 22. – P. 494.
5. Charlson R.J. Paper presented at CACR Symposium on Atmospheric Chemistry, Circulation and Aerosols. Visby, Sweden. – 1965, August 18-25.
6. Безопасность взрывных работ в промышленности. /Под ред. Кутузова Б.Н. – М.: Недра, 1992. – 544 с.
7. Lenard P. Annalen der Phys. – 1915. – B. 47. – S. 413-418.
8. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. – 1965. – Vol. II. – Part 6.
9. Langmuir I. Science. – 1950. – V. 112. – P. 35-40.
10. Langmuir I. J. Meteorol. – 1948. – V. 5. – P. 175-178.
11. Picknett R.G. in Aerodynamic Capture of Particles. – New York: Pergamon Press. – 1960. – P. 295-301.
12. Hocking L.M. Quart. J. Poy. Meteorol. Soc. – 1959. – Vol. 85. – P. 44-51.
13. Oakes B. in Aerodynamic Capture of Particles. – New York: Pergamon Press. – 1960. – P. 181-187.
14. Pemberton C.S. in Aerodynamic Capture of Particles. – New York: Pergamon Press. – 1960. – P. 320-327.

Abstract

The study of the contact and static electricity of bodies is of practical interest, because they lead to the formation of the electric charge on the dust particles, when charging the wells and boreholes by granular explosives. Up to now, there is no rigorous theory of such phenomena and there is no developed mathematical apparatus to analyze them. This article describes a method of calculating the binding energy of the solid state of material (crystal), based on the concept of Lenard-Jones potential. The relation between the binding energy and the ionizing friction force was determined. Some regularities of explosives granules electrification during the charging of wells and boreholes by granular explosives were considered in the article. Crystalline structure of granules and its impact on their destruction were taken into account. The regularities of removal of dust produced by the interaction of explosives granules during the charging of wells and boreholes, and the impact of the fluid on the process of electrification of granules and conditions of additional electrification of particles in the well capacity during the charging were examined. The results obtained in the article allow the development of effective security measures during the pneumatic charging of wells and boreholes by granular explosives

Key words: granule, dipole, the dissociation energy, polarizing power of, electrification

Розглянуто питання технології лазерної підгонки параметрів плівкових елементів, які використовуються для створення прецизійних вимірювальних приладів та інтегральних схем

Ключові слова: тонкоплівкові елементи, лазерна підгонка, фотошаблони, інтегральні та гібридні схеми

Рассмотрены вопросы технологии лазерной подгонки параметров пленочных элементов, которые используются при создании прецизионных измерительных приборов и интегральных схем

Ключевые слова: тонкопленочные элементы, лазерная подгонка, фотошаблоны, интегральные и гибридные схемы

УДК 539.23:621.378.004.14

ПРЕЦИЗИЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ТОНКОПЛІВКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

С.П. Новосядлий
Доктор технічних наук, професор*
Контактний тел.: (0342)-59-60-07
E-mail: nsp@pu.if.ua

А.І. Терлецький
Кандидат фізико-математичних наук, доцент*
Контактний тел.: 099-193-04-69
E-mail: andrei-terletsky@rambler.ru

О.Б. Фрик
Інженер кафедри
Контактний тел.: 095-634-04-52
E-mail: manager@pu.if.ua

*Кафедра радіофізики і електроніки
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76025

1. Вступ

Плівкові елементи широко використовують у приладобудуванні та мікроелектроніці для створення ЕОМ, апаратури зв'язку, систем і засобів автоматизації, вимірювальних приладів та формування структур ВІС [1]. Технічною основою перерахованих приладів і пристроїв є спеціалізовані виробництва мікроелектроніки, такі як інтегральні схеми, гібридно-плівкові мікрозбірки, кварцеві резонатори та фільтри.

Технологія нанесення плівкових елементів базується на трьох основних групах процесів: 1) нанесення плівкових шарів; 2) формування топології

плівкових елементів; 3) забезпечення заданих електрофізичних параметрів та їх точності. Для цього використовують такі способи лазерної обробки плівок, як функціональне налаштування плівкових схем, п'єзокварцевих резонаторів, монолітних фільтрів і НВЧ-схем з розподіленими та зосередженими параметрами, корекція фотошаблонів лазерним ретушуванням, підвищення точності та стабільності резисторів і конденсаторів.

В даній статті висвітлено питання використання лазерів для формування зображень та обробки плівкових елементів у структурах інтегральних схем, зокрема активних RC-фільтрів, які формуються на основі тонко-