

# ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНЫХ И СПЛОШНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Г.Овчаренко, С.Л.Раско

Авторы продолжают серию публикаций по электростатической искробезопасности (первая статья опубликована в Ползуновском вестнике, №1-2, 2008) и предлагают читателям материал об измерении электростатических характеристик, определяющих процесс электризации.

К показателям, характеризующим степень электризации, относятся: удельные электрические поверхностное и объёмное сопротивления  $\rho_S$  (Ом) и  $\rho_V$  (Ом·м); относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ ; удельный массовый заряд  $q_m$  (мкКл/г); поверхностная (или объёмная) плотность зарядов  $\sigma$  (мкКл/м<sup>2</sup>); время релаксации электростатических зарядов  $\tau$  (с). К этой группе показателей можно также отнести потенциал наэлектризованности поверхности  $U$  (кВ) и напряжённость электростатического поля  $E$  (кВ/м) [1].

## Определение удельных электрических сопротивлений сыпучих материалов

Определение электрических сопротивлений твёрдых материалов осуществляют по ГОСТ 6433.2 – 71. Принцип измерения заключается в сравнении измеряемого сопротивления материалов с известным калиброванным сопротивлением путём измерения величины тока утечки через материал, помещённый между электродами, находящимися под заданным напряжением. Для измерения порошкообразных материалов используют изменённую конструкцию измерительной ячейки [2].

На рисунке 1 представлена схема измерения удельных электрических сопротивлений сыпучих материалов. При определении значения  $\rho_V$  ток утечки измеряется между электродами 1 и 2, электрод 3 при этом заземляется.

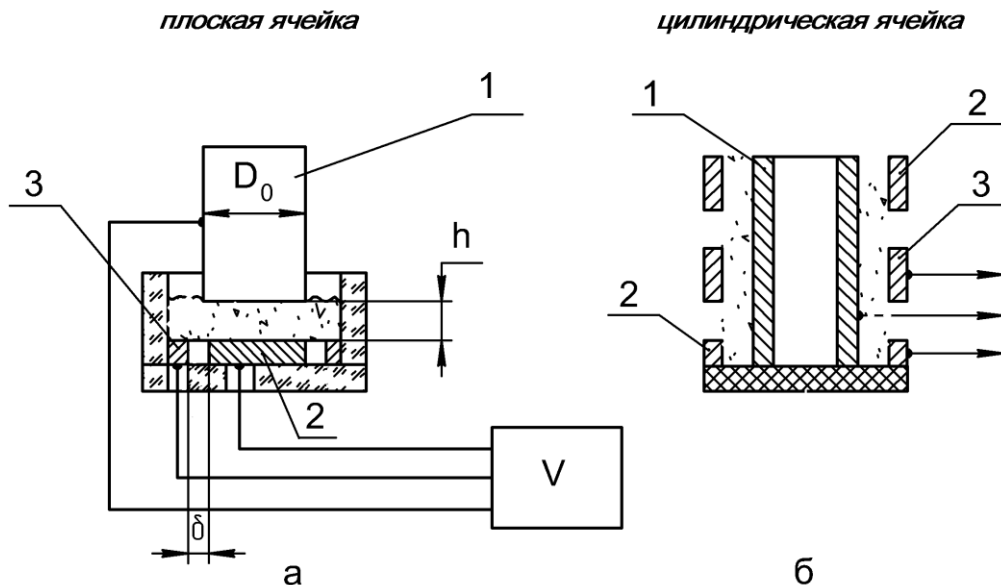


Рис. 1. Схема измерения электрических сопротивлений сыпучих материалов: 1 и 2 - измерительные электроды; 3 – охранный электрод; V – измерительный прибор

Удельное сопротивление образцов рассчитывается по следующим формулам:  
объёмное

$$R = \frac{\pi D_0 \cdot \rho_{VO}}{4h} \quad (1)$$

поверхностное

$$R = \frac{\pi D_0 \cdot \rho_{SO}}{\delta} \quad (2)$$

где  $R_V$  и  $R_S$  – соответственно измеренное объёмное и поверхностное сопротивление

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНЫХ И СПЛОШНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

образца, Ом;

$D_0$  – диаметр измерительного электрода, м;

$h$  – толщина образца, м;

$\delta$  – зазор между измерительным и охранным электродами, м.

Величины  $R_V$ ,  $R_S$  определяются термометрами типа Е6-13 (ЕК6-7) в диапазоне  $10^5 \dots 10^{14}$  Ом с погрешностью  $\pm(2 \dots 20)$  %. Величины  $\rho_V$ ,  $\rho_S$  большинства жидких и твердых материалов, используемых в промышленности, известны [3,4].

Измерения значений  $R_S$  и  $R_V$  сыпучих материалов проводятся при прилагаемом усилии на образец 104 Па. При выравнивании

поверхности сыпучих образцов в ячейке (рисунок 1а) возможно получение разноплотности по объёму, что ухудшает сходимость результатов измерений в параллельных опытах. Отмеченные недостатки устраняются при проведении измерений удельного электрического сопротивления в цилиндрической ячейке коаксиального типа с охранными электродами 3 (рисунок 1б). Геометрические размеры ячейки обеспечивают проведение измерений электрических сопротивлений в равномерном электрическом поле постоянного напряжения исследуемых веществ с размером частиц не более 3 мм.

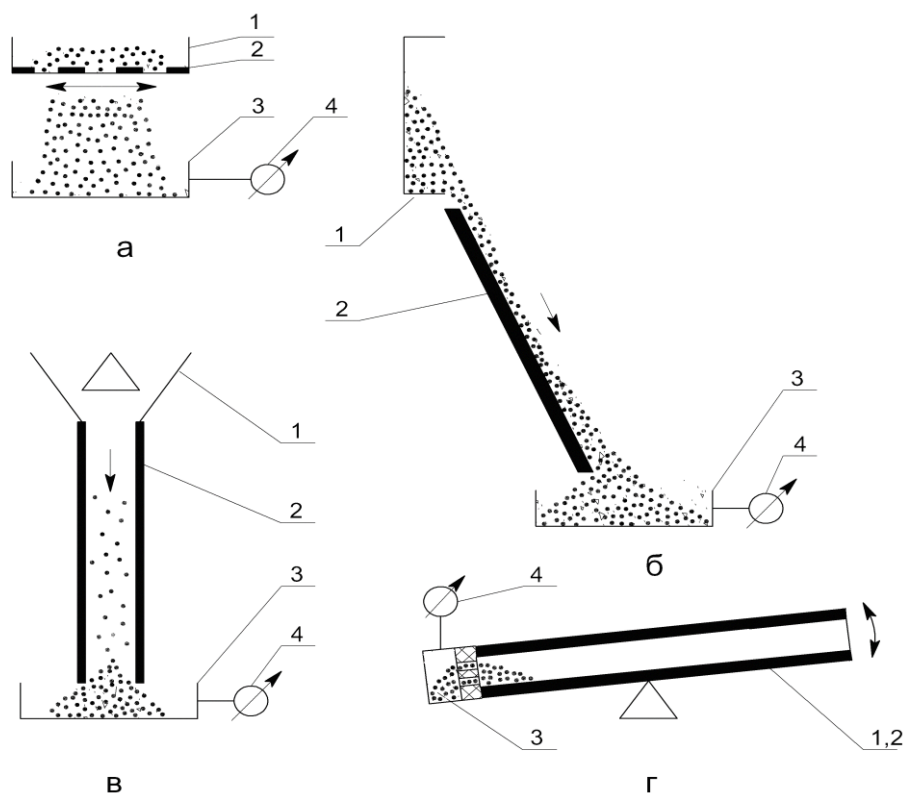


Рис. 2. Схемы установок моделирования электризации сыпучих материалов: 1 – емкость с сыпучим материалом; 2 - контактная поверхность; 3 – приемная емкость; 4 – измерительный прибор а–просеивание; б–сыпание; в–движение потоком; г–перемешивание

### Определение электризуемости сыпучих материалов

Кроме определения значений величин  $\rho_V$ ,  $\rho_S$ , электростатические свойства можно также оценивать по удельному массовому электростатическому заряду порошков  $q_m$ .

Исследования удельного массового электростатического заряда  $q_m$  сыпучих веществ проводятся на экспериментальных установках, имитирующих отдельные технологические фазы производства [5]. Они содержат

узел электризации, в котором вещества приобретают электростатический заряд  $Q$ , и приёмную ёмкость, в которую поступает наэлектризованное вещество. При измерении заряда  $Q$  по методу потенциалов приёмная ёмкость подключается к электростатическому вольтметру типа С-502, С-96 и т.п., при измерении по методу токов – к усилителю постоянного тока, например, входящему в комплект измерительной аппаратуры Н3012. Тогда  $q_m = Q/m$ , где  $m$  – масса навески, которую определяют после поступления вещества в

приёмную ёмкость.

Электризация веществ при просеивании через сито происходит при контакте со стенками ячеек сита (рисунок 2а). Значение заряда  $Q$  измеряется по методу потенциалов (обычно испытывают три навески по 20 г). Полученные результаты существенно зависят от соотношения размеров частиц вещества и ячеек, причём размеры ячеек сит подбираются таким образом, чтобы частицы свободно проходили через сетку.

Оценка электризации при ссыпании вещества по наклонной плоскости важна при операциях загрузки и выгрузки чувствительных к искре сыпучих материалов (рисунок 2б). Данный метод распространяется на вещества с минимальной энергией зажигания от 0,1 до 1,0 мДж. Электростатический заряд определяют по значению потенциала.

При энергии зажигания веществ более 1 мДж величину  $qm$  определяют с учетом зависимости электризуемости сыпучих веществ от плотности их в потоке (рисунок 2в). Электризация материала происходит при его ссыпании через воронку с рассекателем. Определение значения  $Q$  проводят по методу токов

электризации.

В условиях производства вещества подвергаются длительному перемешиванию. Происходящие при этом процессы имитируются испытаниями порошков за счёт перемещения и смешения их внутри качающейся алюминиевой трубки длиной 1 м и диаметром 20 мм под действием силы тяжести до стабилизации процесса электризации (рисунок 2г). Наэлектризованное вещество поступает в металлический стаканчик 3, соединённый с трубкой 1 переходником из органического стекла. Измерения выполняют по методу потенциалов.

Для исследования электризации сыпучих материалов ЦНКБ (г. Москва) и ФНПЦ «Алтай» (г. Бийск) совместно разработали установку ЭП-3М, позволяющую имитировать процессы пневмотранспорта при движении и соударении частиц с различными элементами оборудования (рисунок 3) [1]. Частицы сыпучего материала поступают из вибродозатора 3 в эжектор 4, в котором разгоняются смесью газов ( $N_2$ ,  $CO_2$ ) и, ударяясь о преграду 2, ссыпаются в приёмный короб 1. Смесью газов с воздухом через фильтр 6 выходит наружу.

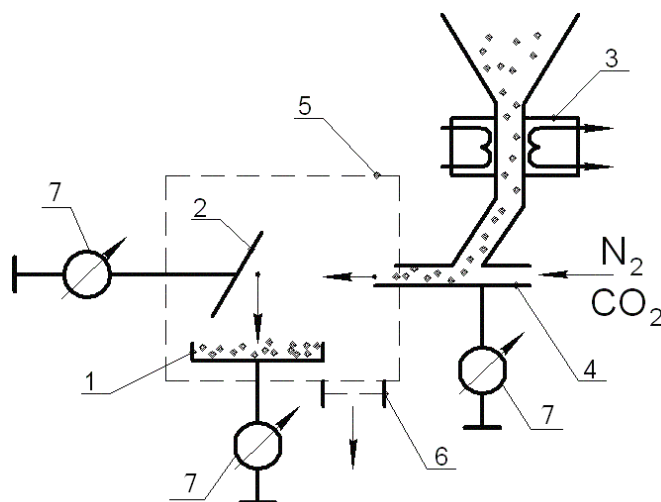


Рис. 3. Установка ЭП-3М для определения электризуемости порошков: 1 – приёмный короб; 2 – преграда; 3 – вибратор; 4 – эжектор; 5 – корпус; 6 – фильтр; 7 – измерительный прибор

В качестве измерительного прибора 7 используется усилитель И-37 в комплекте с самописцем И-37 для определения токов утечки. Массовый заряд на элементах установки определяется по формуле

$$Q = I R C \tau \quad (3)$$

где  $I$  – измеряемый ток утечки;  
 $R$  – сопротивление, равное сопротивлению рамки измерительного прибора;  
 $C$  – суммарная электрическая ёмкость

прибора и элементов установки относительно «земли»;

$\tau$  – время релаксации электростатических зарядов.

При измерениях ток утечки во всех опытах удовлетворяет условию:

$$I_k \tau \ll C \quad (4)$$

где  $I_k$  – измеренный ток утечки короба, мкА;

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНЫХ И СПЛОШНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

$I_{\text{ПР}}$  – ток преграды, мкА;  
 $I_{\text{ЭЖ}}$  – ток с эжектора, мкА;  
 $I_{\text{У}}$  – ток уноса (за счёт оседания частиц на стенки короба, уноса через фильтр и т.п.), мкА.

Результаты экспериментов по электри-

зации на установке ЭП-3М порошкообразного полистирола в зависимости от различных факторов (содержания влаги, %; удельной поверхности частиц  $S_{\text{УД}}$ ,  $\text{м}^2/\text{г}$ ; относительной влажности воздуха  $\phi$ , %; материала преграды, газа -носителя) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные по электризации порошкообразного полистирола

№ экс-перимента	Полистирол	Содержание $\text{H}_2\text{O}$ , %	$S_{\text{УД}}$ , $\text{м}^2/\text{г}$	Газ носитель	$\phi$ , %	Преграда	Приёмный короб		Контакт. материал
						Упр, кВ	Упк, кВ	qpк, мкКл/г	
1	партия М5	0,36	0,59	$\text{CO}_2$	44	11,0	7,4	1,32	нерж. сталь
2	партия М29	0,09	0,10	$\text{CO}_2$	44	11,2	10,0	-2,2	нерж. сталь
3	партия М8	0,09	0,59	$\text{N}_2$	42	15,2	19,5	-4,6	нерж. сталь
4	партия М12	0,36	0,10	$\text{N}_2$	44	12,2	16,2	-2,7	нерж. сталь
5	партия М5	0,36	0,59	$\text{N}_2$	39	20,3	27,0	-3,2	латунь
6	партия М29	0,09	0,10	$\text{N}_2$	40	14,7	22,0	-2,3	латунь
7	партия М24	0,90	0,10	$\text{N}_2$	47	4,4	8,2	-2,0	нерж. сталь
8	партия М5	0,36	0,59	$\text{N}_2$	56	3,2	7,4	-1,2	нерж. сталь
9	партия М5 использование нейтрализатора	0,36	0,59	$\text{N}_2$	40	2,2	0,1	—	нерж. сталь

Из полученных данных заметно влияние различных факторов на электризацию порошков. Так, например, при увеличении содержания влаги в порошке (эксперименты 1, 2) с 0,09 до 0,36 % потенциал и удельный массовый заряд короба снижаются с 10 до 7,4 кВ и с 2,2 до 1,3 мкКл/г соответственно. Увеличение электризации наблюдается при увеличении удельной поверхности частиц с 0,10 до 0,59  $\text{м}^2/\text{г}$  (эксперименты 2, 3). Влияние состава газа на электризацию данных компонентов не обнаружено. При замене преграды из латуни на преграду из нержавеющей стали при прочих равных условиях снижается электризуемость порошков. Анализ экспериментальных данных позволил разработать рекомендации по составу и физико-механическим свойствам материалов для снижения степени

*ПОЛУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2008*

электризации в условиях их переработки.

Для моделирования электризации в условиях, приближенных к производственным, НИИ прикладной механики и математики (г. Томск) совместно с ФНПЦ «Алтай» разработали и апробировали установку для измерения зарядов частиц при соударении их с исследуемым материалом (рисунок 4) [1]. Конструкция установки предусматривает замену последовательно соединённых блоков (бункер 1, разгонный участок 2, фильтрующие устройства в виде сменных циклонов 9). Исследуемый образец 3 закреплён на проводящей подложке 4, которая заземлена через измерительный прибор 5. Измерения зарядов при отработке установки на кварцевом песке различного фракционного состава (рисунок 5) показали хорошую воспроизводимость ре-

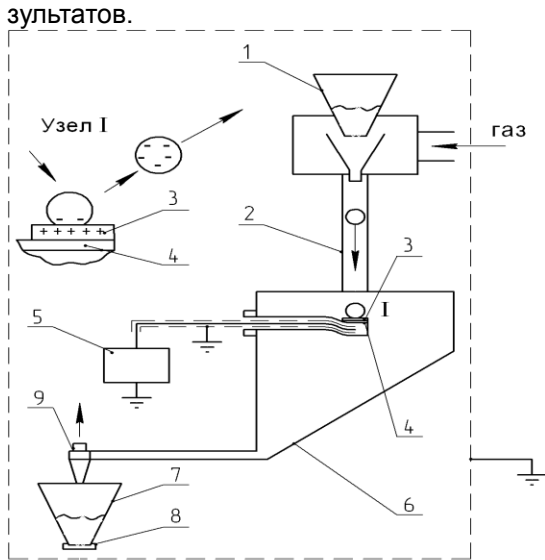


Рис. 4. Установка для измерения заряда частиц дисперсного материала: 1 – бункер; 2 – разгонный участок; 3 – исследуемый образец; 4 – подложка; 5 – измерительный прибор; 6 – корпус; 7 – приемный бункер; 8 – приемная тара; 9 – сменные циклоны

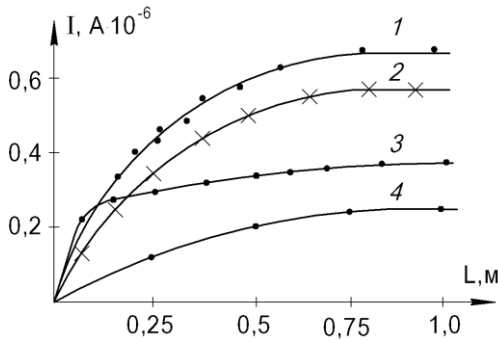


Рис. 5. Зависимость тока электризации подложки I от длины разгонного участка L при скорости потока 10 м/сек и различной дисперсности частиц песка  
1 – 200 мкм; 2 – 150 мкм; 3 – 120 мкм; 4 – 80...100 мкм

### Определение электризуемости твёрдых материалов

Основной величиной, характеризующей электризацию диэлектрических поверхностей является поверхностная плотность зарядов  $\sigma$ , мкКл/м<sup>2</sup>. Для оценки величины  $\sigma$  испытываемый образец обычно заряжают двумя способами – трением образца или его помещением в электрическое поле.

Серьёзным недостатком первого способа является изменение рельефа поверхности образца и разрушение поверхностного слоя при трении, что затрудняет получение воспроизводимых результатов. Во втором случае

появление электростатических зарядов осуществляется в коронном разряде. При этом устраняются недостатки, присущие методам трения, но искажается истинное значение потенциала на поверхности образца.

Перспективным для исследований электризации твёрдых материалов является метод контактного механизма электризации, исключая трение образцов и формирующий двойной электрический слой [6]. В этом случае модель представляют как плоский конденсатор с разноимёнными заряженными обкладками, при разделении которых образуются заряды противоположного знака. Заряд, оставшийся на одной из обкладок, определяется из уравнения:

$$q_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (5)$$

где  $q_0$  – начальный заряд, Кл;  
 $q$  – заряд по истечении времени  $t$ (с), Кл;  
 $R$  – сопротивление исследуемого материала, Ом;  
 $C$  – ёмкость конденсатора, Ф.

После разделения поверхностей плотность зарядов практически можно измерить бесконтактным методом. Измерение производится с помощью цилиндра Фарадея. Заряженное тело помещают в замкнутый металлический экран, обладающий известной электрической ёмкостью по отношению к земле. Так как все силовые линии электростатического поля заряженного тела будут замыкаться внутри электропроводящего цилиндра, то заряд на внешней стенке цилиндра Фарадея по величине и знаку будет равен заряду тела. Потенциал цилиндра измеряется статическим вольтметром или электрометром.

Поверхностную плотность зарядов образцов  $\sigma_{\Phi}$  (Кл/м<sup>2</sup>) вычисляют по формуле:

$$\sigma_{\Phi} = \frac{U \cdot C_{\text{об}}}{S} \quad (6)$$

где  $U$  – напряжение на вольтметре, В;  
 $C_{\text{об}}$  – суммарная ёмкость конденсатора  $C$ , входной ёмкости вольтметра, ёмкости цилиндра Фарадея и ёмкости проводов, Ф;  
 $S$  – площадь электродов, м<sup>2</sup>.

Потенциал на поверхности образца рассчитывают по формуле:

$$U_0 = \frac{\sigma_{\Phi} \cdot h}{\epsilon_0 \cdot \epsilon} \quad (7)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная, Ф/м;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала образца;  $h$  – толщина образца, м.

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНЫХ И СПЛОШНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Значение максимальной плотности зарядов на образцах после разделения может быть достигнуто только при многократном контактировании двух поверхностей при одних и тех же условиях. Поскольку величина и знак зарядов, оставшихся на поверхности после разделения контактирующих материалов, зависит от многих факторов (природы и проводимости контактирующих материалов, характера контакта между ними, линейных размеров контактных пятен, способа разделения образцов, электрических свойств среды, климатических параметров), то многократное контактирование будет способствовать повышению плотности электростатических зарядов на поверхности до определенной степени насыщения.

Для исследования электризации сплошных твердых материалов при многократном контактировании была разработана установка УЭТМ, при применении которой значительно повышается достоверность полученных результатов по сравнению с существующими

аналогами [1].

Работа установки (рисунок 5) заключается в многократном контактировании и последующем разделении посредством вертикального перемещения с помощью кривошипного механизма 10 сопрягаемых торцевых поверхностей цилиндрических образцов 4, 5, размещенных соосно в гнездах изоляторов 11, 12. Изоляторы закреплены на металлических подложках 2,3, образующих с исследуемой поверхностью образцов плоский конденсатор с расстоянием между обкладками  $d$ , намного меньшим линейных размеров обкладок. Верхний исследуемый образец 4 с изолятором 11 и подложкой 2 размещены в цилиндре Фарадея 6, который подключен к образцовому конденсатору 19 и соединен с неподвижной ламелью  $n$ -конечного выключателя  $S1$  и с высокоточным электрометром 7 (например ВК7-9) в комплекте с самописцем 8. Давление на образцы при контактировании осуществляется за счёт изменения груза 18,

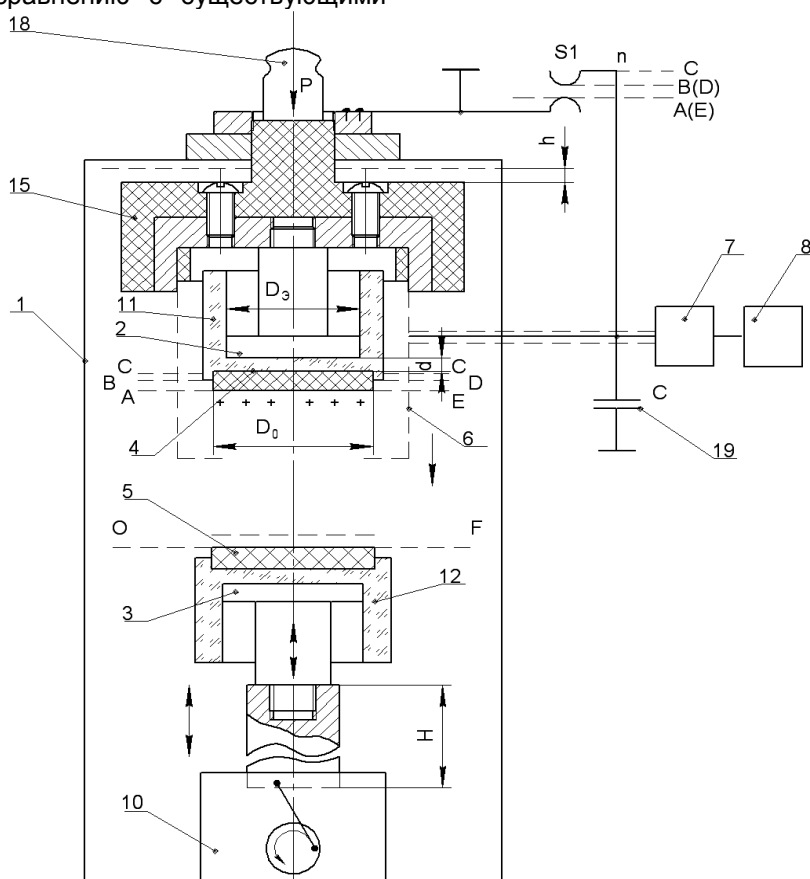


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для исследования электризации твердых материалов УЭТМ

установленного на корпусе 15 сборки. Вся установка помещена в герметичный корпус 1. Следует отметить, что после каждого цикла измерения происходит сброс остаточного заряда на цилиндре Фарадея на "землю" переключателем  $S1$ , за счёт чего достигается

цикла измерения происходит сброс остаточного заряда на цилиндре Фарадея на "землю" переключателем  $S1$ , за счёт чего достигается

периодическое измерение каждого цикла (контакт – разрыв) до насыщения поверхности электростатическими зарядами.

На рисунке 7а показана кинематическая диаграмма движения поверхности OF нижнего образца, общий прямой ход которого Н составляет 80 мм. OA – прямой ход образца до контактирования; АВ (DE) – момент контактирования под нагрузкой Р (кг); ВС (CD) – замыкание цилиндра Фарадея на “землю”; CF – обратный ход образца. Общее время цикла OF составляет 20 с. На рисунке 7б показана диаграмма изменения потенциала на образ-

цовом конденсаторе С одного цикла, соответствующая по времени кинематическому движению поверхности образца, а на рисунке 7в потенциал на конденсаторе (цилиндре Фарадея) N циклов до насыщения  $U_{нас}$ . При последовательном нагружении образца нагрузками величиной  $P_1, P_2, P_3$  суммарный потенциал образца  $U(B)$  также увеличивается, причём значения потенциалов при каждой нагрузке  $U_1, U_2, U_3$  изменяются по экспоненте (рисунок 7г).

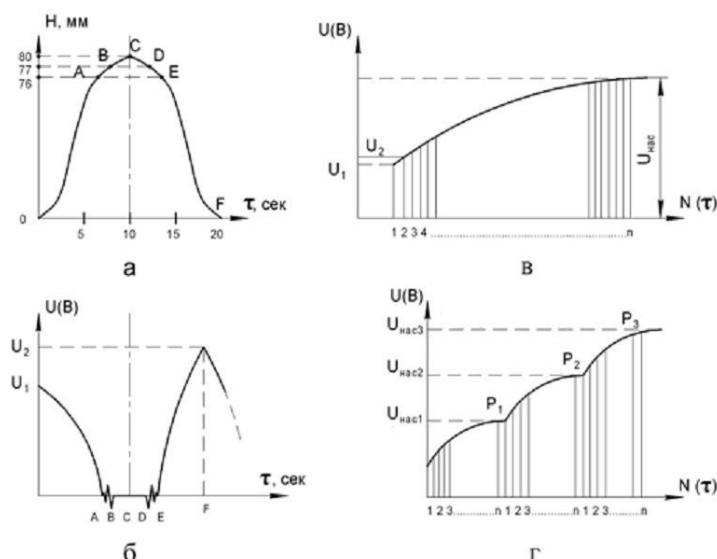


Рис. 7. Функциональные диаграммы изменения параметров электризации образцов на установке УЭТМ: а – изменение расстояния между образцами при движении нижнего образца (вверх – вниз); б – диаграмма изменения потенциала на образцовом конденсаторе С за один цикл; в – потенциал электризации на образце за N циклов до насыщения; г – суммарный потенциал электризации в зависимости от нагрузки Р(кг)

Ниже приведены в качестве примера данные о плотности зарядов различных пар контактируемых материалов.

	$\sigma$ , мкКл/м <sup>2</sup>
Полиэтилен – нержавеющая сталь . . . . .	28,0
Полистирол – нержавеющая сталь . . . . .	36,0
Капролактан – нержавеющая сталь . . . . .	42,0
Ацетат целлюлозы – эбонит. . . . .	82,0
Нитрат целлюлозы – эбонит. . . . .	98,0
Фторопласт – нитрат целлюлозы. . . . .	190,0
Фторопласт – полистирол. . . . .	82,0
Фторопласт – эбонит. . . . .	96,0
Этилцеллюлоза – эбонит. . . . .	98,0

Герметичность корпуса установки позволяет проводить исследования электризации материалов в зависимости от различных факторов окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Овчаренко А.Г. Электростатическая безопасность пожаро- и взрывоопасных производств. / А.Г.Овчаренко, С.Л. Раско – Бийск: Изд-во Алт. Гос. техн. ун-та, 2006 – 156 с.
- 2.Федотова Н. Ф. Методы исследования электростатических свойств сыпучих материалов / Н. Ф. Федотова // Техника. Технология. Управление – 1991 - №2 – С. 30-34.
- 3.Василёнок Ю. И. Защита полимеров от статического электричества / Ю. И. Василёнок – М.: Химия, 1975 – 180 с.
- 4.Шевердяев О. Н. Антистатические полимерные материалы / О. Н. Шевердяев – М.: Химия, 1983 – 170 с.
- 5.Федотова Н. Ф. Новый метод определения электризуемости сыпучих веществ / Н. Ф. Федотова, Л. П. Надеждина // Техника. Технология. Управление – 1991 - №1. – С.18.
- 6.Луцейкин Г. А. Методы исследования электрических свойств полимеров / Г. А. Луцейкин – М.: Химия, 1989 – 105 с.