

01; 02; 03; 04; 12

© 1993

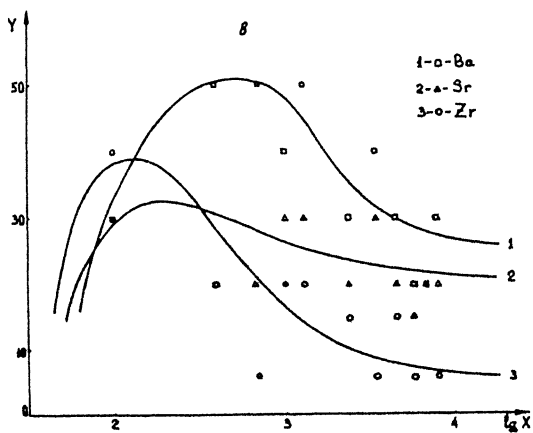
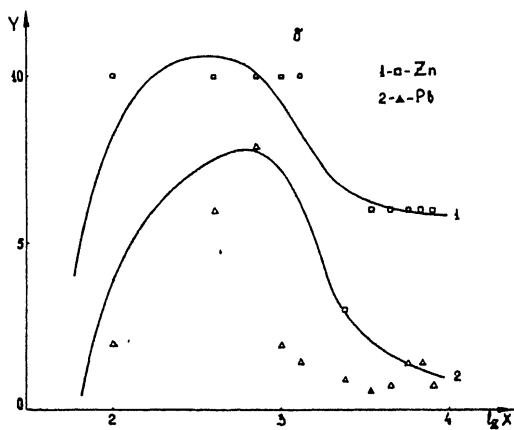
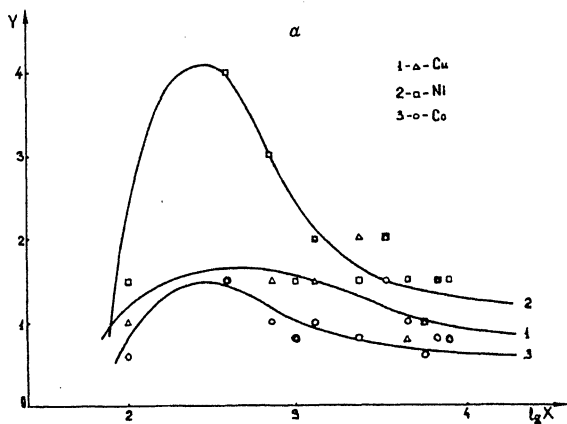
ЭФФЕКТ ЕСТЕСТВЕННОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ  
ОСЕДАЮЩЕГО ДЫМНОГО АЭРОЗОЛЯ

Т.И. Сидорова, А.И. Григорьев

1. Как известно, одним из основных источников загрязнения почвы урбанизированных территорий тяжелыми элементами является дымовой аэрозоль. При плановых экологических исследованиях в окрестностях нефтеперегонного завода были проведены измерения содержания в почве различных химических элементов. На рисунках представлены полученные зависимости процентного содержания в почве (в относительных единицах)  $Pb$ ,  $Ni$ ,  $Cu$ ,  $Zn$ ,  $Zr$ ,  $Ba$ ,  $Co$  от расстояния до места выброса дыма в атмосферу (в направлении преобладающего ветра). В представленных зависимостях бросается в глаза несовпадение положений максимумов концентрации различных элементов. Этот результат является, вообще говоря, неожиданным, т.к. опосредованно через закономерности оседания дыма на почву указывает на различие в физико-химических свойствах частиц дыма одинакового происхождения.

Отметим, что сам факт появления при сжигании горючих веществ сложного химического состава в дымном аэрозоле частиц с различными физико-химическими свойствами не вызывает удивления, т.к. химический состав конкретной частицы определяется всей ее историей: местом зарождения в факеле горения, химическим составом и температурой окружающих паров и продуктов сгорания. Примем, в качестве исходной идеализации, что формирование частицы дыма происходит вследствие конденсации паров на ядре в соответствии с уравнением Максвелла, согласно которому поток конденсирующегося пара некоего вещества на частицу пропорционален разности парциального давления пара этого вещества в окружающей среде и у поверхности капли, где их можно считать насыщенными [1]. Если же принять во внимание, что давление насыщенного пара экспоненциально изменяется с температурой, то несложно видеть, что частицы дыма, находящиеся в центре пламени и на его периферии, будут окружены газообразными продуктами сгорания с температурой, различающейся на несколько сотен градусов. В такой ситуации потоки массы конденсирующихся на частицы в двух рассматриваемых ситуациях будут различаться как по интенсивности, так и по химическому составу. В итоге разброс в физико-химических характеристиках вещества различных частиц дыма может быть весьма широким.

Дальнейшая эволюция дымового аэрозоля, образующегося при горении, связана с его зарядкой вследствие термоэмиссионных процессов и взаимодействием с электронами и ионами в слабоионизо-



ванной плазме, которую представляет собой пламя 2. Но эта исходная зарядка дымовых частиц вряд ли играет существенную роль в их дальнейшей судьбе. Прежде чем попасть в атмосферу, дымный аэрозоль проходит через плазму коронного разряда в электрофилт্রে, задерживающем значительную часть частиц и сообщаящий прошедшим сквозь него частицам дыма электрические заряды, причем в электрофилт্রে задерживаются в основном частицы дыма с удельным сопротивлением, изменяющимся в диапазоне от  $10^4$  до  $10^{10}$  Ом·см [3]. Частицы же дыма с хорошей электропроводностью, у которых удельное сопротивление меньше  $10^4$  Ом·см, быстро перезаряжаются на осадительном электроде электрофилтра, отгальваются от него, снова попадают в газовый поток и выносятся им в атмосферу. Вещества, интересующие нас в проводимом рассмотрении, имеют удельную электропроводность, большую  $10^{-4}$  Ом·см $^{-1}$  и, следовательно, поступают в атмосферу в виде заряженных частиц. Тем не менее окислы свинца и кобальта имеют на три-четыре порядка большую электропроводность по сравнению с окислами  $Ba$ ,  $Sr$ ,  $Zn$ ,  $Ni$  и  $Cu$ , что и приведет в конечном итоге к тому, что частицы дыма, состоящие преимущественно из  $PbO$  и  $CoO$  будут иметь при выходе в атмосферу заряды большие, чем частицы дыма, состоящие в основном из окислов  $Ba$ ,  $Zn$ ,  $Sr$ ,  $Ni$  и  $Cu$ .

2. Рассмотрим закономерности оседания на почву заряженной зарядом  $q$  сферической аэрозольной частицы радиуса  $r$  с массой  $m$ . Предположим, что заряд и масса частицы за время наблюдения остаются неизменными. Тогда уравнение движения такой частицы в воздушном потоке со скоростью  $\vec{U}$  в окрестности частицы, увлекающем частицу, можно записать в виде [1]:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r (\vec{U} - \vec{V}) - m \cdot g \cdot \vec{n}_z + q \cdot E \cdot \vec{n}_z, \quad (1a)$$

где  $\vec{V}$  – скорость центра тяжести частицы,  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля,  $g$  – ускорение свободного падения ( $\vec{E} \parallel \vec{n}_z$ ),  $\vec{n}_z$  – орт вертикальной оси ( $\vec{g} \parallel -\vec{n}_z$ ),  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха. Перепишем (1a) в более удобном для дальнейших рассуждений виде, вводя характерное время релаксации скорости аэрозольной частицы  $\tau = m / 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r$  [1]:

$$\tau \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{V} = \vec{U}_0, \quad \vec{U}_0 = \vec{U} + \tau \cdot \left( \frac{q}{m} \cdot E - g \right) \vec{n}_z. \quad (16)$$

Зависимости процентного содержания в почве (в относительных единицах) химических элементов от расстояния до источника их попадания в атмосферу.

В силу независимости движений вдоль вертикальной и горизонтальной осей несложно найти, что скорость оседания частицы на почву (скорость движения вдоль вертикальной оси) в любой момент времени имеет вид

$$V_z = \tau \cdot \left( \frac{q}{m} \cdot E - g \right) + \left[ V_{0z} - \tau \left( \frac{q}{m} \cdot E - g \right) \right] \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

где  $V_{0z}$  — вертикальная компонента скорости аэрозольной частицы, с которой она попадает с воздушным потоком в свободную атмосферу, имеющая смысл начальной скорости в уравнении (16). Из (2) видно, что при  $t \gg \tau$  вторым слагаемым, пропорциональным экспоненте, можно пренебречь, и скорость оседания частицы становится стационарной (в пренебрежении слабой зависимостью  $F = F(z)$ ). Как видно, величина стационарной скорости оседания определяется соотношением между силой тяжести, действующей на частицу, и силой ее взаимодействия с электрическим полем (которое в грозовую погоду направлено к земле [5]). Легко видеть, что, когда  $q \cdot E = m \cdot g$ , стационарная скорость оседания частицы обращается в ноль. Из элементарных оценок следует, что такое подвешивание частиц в атмосфере происходит, например, при  $r \approx 0.25$  мкм и  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $q \sim 100 \cdot e$  (где  $e$  — заряд электрона)  $E \approx 1$  В/см [5]. Принятая при оценке величина заряда частицы соответствует условиям естественной зарядки в плазме коронного разряда для частицы дыма заданного размера [6]. Здесь уместно задаться вопросом: что будет происходить с частицей при изменении ее заряда и размера по сравнению с вышеприведенными.

Для ответа на такой вопрос необходимо учесть условия зарядки частиц. Если частица приобретает заряд в поле коронного разряда, то, согласно [6], она получает заряд порядка максимального при ударной зарядке потоком ионов:

$$q_* = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \cdot E_* \cdot r^2, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость частицы, а  $E_*$  — напряженность внешнего электрического поля в ее окрестности. Для проводимого рассмотрения важно, что с изменением размера частицы ее заряд изменяется  $\sim r^2$ , тогда как масса частицы при этом изменяется  $\sim r^3$ . В итоге получим, что с увеличением размера частицы роль взаимодействия электрического заряда с приземным электрическим полем на скорость оседания частицы будет быстро уменьшаться. И уже при  $r > 3$  мкм такое взаимодействие будет пренебрежимо малым по сравнению с влиянием силы тяжести.

Если же частицы дыма, будучи хорошо проводящими, приобретают свой заряд при переразрядке на осадительном электроде, то

в этом случае заряд частицы определится соотношением:  $q \approx \varphi \cdot r$ , где  $\varphi$  — потенциал осадительного электрода. В этом случае влияние изменения размера частицы и взаимодействия ее заряда с электрическим полем на закономерности ее оседания на почву в качественном отношении будет таким же, как и в рассмотренной выше ситуации зарядки частицы в плазме коронного разряда; нужно только учесть, что заряд частицы, приобретаемый таким образом, будет иметь знак, противоположный знаку заряда частицы, заряженной в коронном разряде. Влияние заряда на закономерности оседания частицы дыма на почву будет незначительным уже при  $r > 1$  мкм, т.к. увеличение заряда частицы с увеличением ее размера будет более слабым  $q \sim r$ .

Для объяснения данных измерений можно высказать два предположения: частицы дыма, состоящие преимущественно из окислов  $Pb$ ,  $Zr$ ,  $Co$  по сравнению с другими оседают быстрее, потому что: 1) имеют большие размеры; 2) их заряд противоположен по знаку заряду частиц, состоящих из других окислов.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Р а й с т П. Аэрозоли. М.: Мир, 1987. 280 с.
- [2] Ж у х о в и ц к и й Д.И., Х р а п а к А.Г., Я к у б о в И.Т. Химия плазмы. № 11. М.: Энергоатомиздат. 1984. С. 130-170.
- [3] В е р е ш а г и н И.П., Л е в и т о в В.И., М и р з а б е к я н Г.З., П а ш и н М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем М.: Энергия, 1974. 480 с.
- [4] С а м с о н о в Г.В., Б у л а н к о в а Т.Г. и др. Физико-химические свойства окислов. М.: Metallургия, 1969. 456 с.
- [5] Ф р е н к е л ь Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. Л.-М.: Гостехтеориздат, 1949. 156 с.
- [6] Е м е ц Е.П., К а щ е е в В.А., П о л у э к т о в П.П. и др. Исследование электрической зарядки аэрозолей в различных условиях. Препринт ЦНИИАтоминформ № 2 (136). 1991. 31 с.

Ярославский государственный  
университет

Поступило в Редакцию  
26 января 1993 г.