

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

А.Г. Варехов¹

*Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики (СПб ГУСЭ),
191015, Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 7*

Ионизация и объемный электрический заряд воздуха, в частности, при наличии тяжелых частиц биологической природы, становится все более представительным показателем качества воздушной среды. Это наиболее актуально для внутреннего воздуха жилых помещений как с точки зрения оценки качества среды обитания человека, так и с точки зрения задач конструирования устройств кондиционирования.

Ключевые слова: внутренний воздух, ионизация, биоаэрозоль, объемный электрический заряд, измерение.

THE EVALUATION OF AIR QUALITY OF LIVING SPACE BY MEASUREMENTS OF VOLUME ELECTRIC CHARGE

A.G.Varekhov

*St.-Petersburg state university of service and economy (SPbSUSE),
191015, St.-Petersburg, street Kavalergardsky, 7 A.*

The ionization and volume electric charge of air especially in the presence of heavy particles of the biological nature becomes more and more representative indicator of air quality. It is most actual for indoor air of housing rooms proceeding from requirements to habitat of the person but also in connection with problems of air conditioning.

Keywords: indoor air, ionization, bioaerosol, volume electric charge, measurement.

Интерес к атмосферному электричеству известен с древности, поскольку во все времена существовала физиологическая чувствительность к атмосферным явлениям. Хорошо известно, что атмосферные фронты и приближающиеся грозы сопровождаются увеличением концентрации положительных ионов. Известны также и массовые наблюдаемые явления – мигрени, неврозы, снижение пульса и общее ухудшение самочувствия. Уже к концу 18-го века Франческо Гардини в Италии и Пьер Бертолон во Франции [1] называли отрицательное электричество здоровым, а положительное – болезненным. Но сегодня, когда, с одной стороны, большинство населения живет и работает в небольших замкнутых помещениях, а развитие промышленности, с другой стороны, приводит к быстрому загрязнению атмосферы, качество атмосферного воздуха в значительной мере определяет и качество жизни. Отметим, что термин «загрязнение атмосферы» следует понимать, прежде всего, как присутствие в воздухе достаточно крупных аэрозольных частиц, включая частицы биологической природы. Соответственно, качество воздуха внутренних помещений определяется, прежде всего, наличием таких частиц. Достаточно отметить [2], что загрязнение воздуха рассматривается сегодня как одна из главных экологических причин раковых заболеваний. Общеизвестно, например, что продукт термического разложения жиров акролеин, относящийся к первому классу опасности (чрезвычайно опасные вещества) содержится в

так называемом «кухонном чаде», действию которого подвержено большинство людей. Наконец, в замкнутых обитаемых помещениях возможно образование устойчивых униполярных аэродисперсных систем, обозначаемых сегодня как комнатный смог.

Оценка качества воздуха основывается, в целом, на изучении трех существенно отличающихся друг от друга компонентов. Во-первых, это ионизация воздуха и отличающиеся от нормы параметры: проводимость воздуха; концентрация ионов; спектральный состав, заряд и подвижность ионов; макроскопическая напряженность электрического поля. Во-вторых, это химические возмущения воздушной среды, включая двуокись углерода, двуокись серы и летучие органические соединения (VOC – volatile organic compounds). В-третьих, это частицы различного происхождения, включая биологические, несущие значительный по величине электрический заряд.

Чрезмерный объемный электрический заряд может рассматриваться как элементарный патогенный раздражитель, действующий на большую совокупность рецепторов. Генерация избыточного (ненулевого) пространственного заряда воздуха и его измерения отражают разнообразные процессы, происходящие во внутренней среде обитания, в том числе процессы ионизации под действием ультрафиолета или слабого рентгеновского излучения, термическую ионизацию, пылеобразование, дробление (атомизацию) жидкостей, включая испаре-

ние, автономное существование в воздушной среде бактериальных клеток или спор плесневых грибов и другие многочисленные процессы. Эти измерения могут стать особенно ценными для предикции (предсказания) эволюции аэродисперсных систем, в частности, в направлении образования комнатного смога.

Распределение зарядов частиц для стационарной аэродисперсной системы при симметричной биполярной зарядке описывается больцмановской функцией вида [3]

$$f(n) = \frac{1}{N} \exp[-(ne)^2 / 8\pi\epsilon_0 rkT],$$

где: e – заряд электрона; ϵ_0 – электрическая постоянная; r – радиус частицы; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; n – положительные и отрицательные целые числа или нуль; N – суммарное число частиц, получающееся как результат суммирования по всем значениям n . Таким образом, благодаря симметрии суммарный заряд единицы объема равен нулю. Полная или почти полная симметрия для легких ионов уже давно отмечена, например, над поверхностью океанов или на высоте 4000 метров, но также и для некоторых городских территорий [1].

Зарядовая асимметрия характеризуется коэффициентом униполярности, определяемым как отношение концентраций положительных и отрицательных ионов (n_+/n_-).

Известно [4], что 70÷90 процентов частиц в тропосфере имеют размеры от 0,001 мкм до 0,05 мкм. Частицы радиусом 0,01 мкм большей частью (90%) электронейтральны и только 10% частиц имеют заряд $\pm e$. Частицы радиусом 0,05 мкм на 43% электронейтральны; 48% частиц имеют заряд $\pm e$, 8,6% – $\pm 2e$ и 0,4% – $\pm 3e$. Из практики электрофильтрации хорошо известно, что заряд субмикронных частиц обычно составляет $1e$. Частицы комнатного аэрозоля значительно крупнее (более 0,1 мкм) и процент заряженных частиц среди них гораздо больше. Константа тепловой коагуляции для частиц одинакового размера относительно мала [3], но она существенно возрастает при наличии относительно крупных частиц. Следует отметить, кроме того, что напряженность электрического поля у поверхности частицы, несущей заряд $1e$ и имеющей радиус 0,1 мкм, равна приблизительно $1,6 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$, то есть значительно меньше границы ионизации ($5 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$) самой частицы [5].

Кинетика зарядки хорошо исследована аналитически во многих работах. Кирш и Загнитко [6] обосновали следующее соотношение:

$$q(t) = 4\pi\epsilon_0 \left[\frac{3\bar{r}kT}{e} \lg(A\sigma t) + \left(1 + 2 \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right) \frac{\bar{r}^2 E \pi \sigma t}{4\pi\epsilon_0 + \pi \sigma t} \right],$$

где: \bar{r} – средний радиус частицы; \bar{r}^2 – средний квадрат радиуса частицы; E – напряженность электрического поля у поверхности частицы; σ – проводимость воздуха; ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}\cdot\text{м}^{-1}$;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость частицы; $A\sigma t$ – безразмерная кинетическая функция диффузионной зарядки. Дрейфовая составляющая зарядки (второе слагаемое в квадратных скобках), как правило, не очень существенна, исключая те места вблизи поляризованной поверхности частицы, где напряженность поля может быть очень велика.

Уравнение стационарного состояния ионного баланса при условии отсутствия адвективного (посредством ветра), электрического и турбулентного переноса ионов записывается в виде [7]: $v = \alpha_+ n_+ n_- + \beta_+ n_+ N_a$,

где v – скорость образования ионов. Первое слагаемое справа описывает рекомбинацию ионов (n_+, n_- – концентрации ионов, α_{\pm} – коэффициенты рекомбинации). Второе слагаемое справа описывает процесс конверсии ионов в аэрозольные частицы или адсорбции ионов на аэрозольных частицах, включая составляющие $\beta_{0+} n_+ N_0$ (адсорбция положительных ионов на нейтральной частице), $\beta_{0-} n_- N_0$ (адсорбция отрицательных ионов на нейтральной частице), $\beta_{-+} n_+ N_-$ (адсорбция положительных ионов на отрицательно заряженной частице) и другие слагаемые. Использовались известные [5] экспериментальные значения конверсионных слагаемых, в частности, $\beta_{0+} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $\beta_{0-} = 2,34 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $\beta_{+-} = 5,22 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, а также и всех других слагаемых. Среднее значение для всех составляющих получается равным $\beta = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Запишем далее уравнение стационарного состояния при условии $n_+ = n_- = n$ в следующем виде: $an^2 + 2\beta N_a n - v = 0$.

Элементарный анализ этого уравнения выражается в следующих оценках безразмерного параметра $\alpha v / \beta^2 N_a^2$:

1. Низкая концентрация частиц:

$$\frac{\alpha v}{\beta^2 N_a^2} \gg 1, \text{ откуда } n = (v/\alpha)^{1/2}.$$

Подставляя фоновые значения [8] $v = 10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ и $\alpha = 10^{-7} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, получаем $n = 10^3 \text{ см}^{-3}$.

2. Высокая концентрация частиц:

$$\frac{\alpha v}{\beta^2 N_a^2} \ll 1, \text{ откуда } n = v/2\beta N_a.$$

Подставляя значение $\beta = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, получаем условие $N_a > 10^3 \text{ см}^{-3}$. Полученные оценки имеют следующий физический смысл.

1. Значение, полученное для концентрации ионов, то есть $n = 10^3 \text{ см}^{-3}$ при $N_a = 0$, типично для свободной атмосферы и соответствует эволюционно сложившейся физиологической норме. Это значение, как уже отмечалось выше, примерно соответствует также ионизации над поверхностью океана. Наконец, это значение соответствует принятой в РФ гигиенической норме (биологическая единица аэроионизации в естественных условиях, БЕ [9]). Для взрослого человека это означает вдыхание в течение суток $8 \cdot 10^9$ легких ионов, а суточной нормой для здорового взрослого человека считается (2-3)БЕ. По некоторым дан-

ным [1], снижение концентрации легких ионов до 50 см^{-3} вызывает головокружение, тошноту и общую слабость.

2. При концентрации частиц $N_a = 10^3 \text{ см}^{-3}$ (при этом весовая концентрация частиц радиуса $0,1 \text{ мкм}$ равна примерно $0,004 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, а концентрация ионов $n = 1,37 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$) присутствие частиц еще не изменяет заметно естественную ионную компоненту. Постоянная времени

$$\tau = 1/2\beta N_a$$

определяет скорость ионной конверсии при заданных значениях концентрации ионов и производительности ионного источника. Принимая $n = 10^3 \text{ см}^{-3}$ и $v = 10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, получаем $\tau = 100 \text{ с}$ секунд.

Нестационарное уравнение ионного баланса представим в виде (общее уравнение Риккати)

$$v + \frac{dn}{dt} = \alpha n^2 + (1/\tau)n.$$

Подстановка $n = (z/\alpha) - (1/2\tau\alpha)$ приводит к специальному уравнению Риккати

$$\frac{dz}{dt} - z^2 = -\mu,$$

где $\mu = \alpha v - 3/4\tau^2$.

Решение дается приближенным соотношением

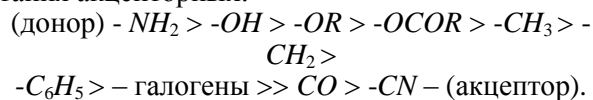
$$n(t) = \frac{4n_0\tau^2\alpha + t(1 - 4\mu\tau^2)}{2\tau\alpha(2\tau - t)}$$

при условии $t < 2\tau$. Кроме того, очевидно, что при $t = 0$ концентрация $n = n_0$. Отсутствие асимптотического решения объясняется тем, что коэффициенты α и β предполагаются независимыми от концентрации и дисперсного состава частиц.

Если средняя скорость генерации ионов достаточно велика, то есть значительно больше фонового значения, $(dn/dt) \gg v$; если также $(dn/dt) \gg (1/\tau)n$ и, кроме того, $(1/\tau) \gg \alpha n^2$, то концентрация увеличивается экспоненциально или же в соответствии с последним выражением.

Продуцирование в воздухе высокоскоростных электронов и отрицательных ионов стабилизирует, при наличии относительно больших частиц, отрицательный пространственный заряд и в конечном итоге формирование стабильного униполярного аэрозоля, включая такие предельные формы, как комнатный смог. Как и всегда, определенную роль при этом играет фотоионизация. Это состояние устанавливается тем скорее, чем меньше постоянная времени τ . Кроме того, процесс может происходить значительно быстрее, если крупные частицы исходно отрицательно заряжены. Таким образом, можно полагать, что даже если сравнительно быстро устанавливается зарядовая симметрия или нейтрализация зарядов легкоподвижных фракций частиц, но существует относительно долгоживущая отрицательно заряженная фракция тяжелых частиц, то именно она и определяет гигиенический статус воздушной среды. Это может быть тем более важно, если взвешенные частицы биологически активны. Можно отметить, по крайней мере,

три практических случая, относящихся к внутренней среде обитания, когда это является существенным. Во-первых, фотоионизация за счет внутренних источников ультрафиолета, например, УФ-принтеров, и рентгеновских фотонеров. Во-вторых, генерация отрицательно заряженных частиц при атомизации жидкостей, прежде всего воды, дробление водяных струй, а также и такие банальные процессы, как кашель и чихание. При атомизации воды частицы обычно получают отрицательный заряд. Этот факт известен как эффект Ленарда уже с 1892 года. Для объяснения отрицательности заряда частиц целесообразно привести известный [5] ряд функциональных групп, расположенных по мере убывания донорных (по отношению к электрону) свойств и, соответственно, возрастающих акцепторных:



При отделении суспендированных в водной среде клеток в процессе атомизации (распылении) суспензий карбоксильные группы клеточной поверхности (акцепторы) должны заряжаться отрицательно по отношению к гидроксилам воды (донорам). Образующаяся таким образом аэродисперсная система (биоаэрозоль) оказывается заряженной отрицательно. Многочисленные процессы флуидизации и, в частности, процесс отрыва спелых спор плесневых грибов, происходят подобным образом с образованием отрицательно заряженной аэродисперсной системы. Ниже приводится описание методики проведения экспериментов.

Модельный аэрозоль генерировался в экранированной электрически камере с перемешиванием объемом около ста литров. Пространственный заряд частиц (клеток) измерялся с помощью электромметра с крутизной преобразования $10^{14} \div 10^{15}$ вольт на кулон. Хорошо изолированный электрически специальный коллектор в форме диска диаметром 40 мм и толщиной 5 мм на основе пористого титана с размерами пор около 1 мкм использовался для сбора взвешенных частиц и, соответственно, измерения их суммарного заряда. В качестве исходного материала коллектора использовались пластины пористого титана производства НПО «ПМ» (порошковые металлы), г. Минск. Объемный расход воздуха через коллектор был во всех экспериментах выбран равным 20 литров в минуту. Измеренная экспериментально собственная электрическая емкость коллектора составляла 1,2 нФ. Аналитические аэрозольные фильтры (известные как АФА) на основе полимеризованных волокон из перхлорвинила использовались для измерения весовой концентрации частиц. Параллельно для измерения объемной концентрации частиц использовался специально разработанный для этой цели прибор, в котором частицы, предварительно заряженные в электрическом поле униполярного коронного разряда, также накапливались на стандартном

аналитическом фильтре. Сопоставление тех и других данных использовалось для определения заряда частиц.

Эффективность осаждения частиц на пористом титановом коллекторе была близка к 100 процентам. Пространственный заряд воздуха определялся по формуле

$$q_s = \frac{U_m}{k_u w R_l},$$

в которой: U_m – измеренный потенциал коллектора; k_u – коэффициент усиления по напряжению электрометрического усилителя, $k_u = 10$; w – объемный расход воздуха, $w = 20 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$; R_l – сопротивление утечки, $R_l = 10^{11} \text{ Ом}$. Таким образом, получаем $q_s = 3 \cdot 10^{-15} U_m$ [$\text{Кл} \cdot \text{см}^{-3}$] при условии, что потенциал измеряется в вольтах. Приведенная формула для заряда получается из равенства двух токов, один из которых определяется потоком частиц на коллектор, а второй – током утечки; такое динамическое равновесие устанавливается со скоростью, определяемой постоянной времени $\tau_l = R_l C_c = 0,12 \text{ с}$ ($C_c = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$).

Атоизатор жидкости был использован для генерации аэрозоля дрожжевых клеток *Saccharomyces carlsbergensis*. Объемный расход воздуха в канале атоизатора составлял 8,8 литра в минуту; избыточное давление сжатого воздуха 0,26 атмосферы; диаметр распыляющего сопла – 0,5 мм. Диспергирование дистиллированной воды давало субмикронный аэрозоль с размерами частиц около 0,1 мкм; диспергирование клеточной суспензии давало интактные дрожжевые клетки с эквивалентным радиусом около 1,8 мкм. Мы исходили из предположения, что отделение клеток от водной основы при диспергировании происходит вдоль эквипотенциальной поверхности гидродинамического скольжения и, следовательно, заряд отделяемых клеток определяется их электрокинетическим потенциалом в суспензии. При этом должны выполняться следующие простые соотношения [9]:

$$r_c \cong a + 0,7l_D; \zeta \cong (1/2)\varphi_s,$$

где: r_c – электрокинетический радиус частицы; a – геометрический радиус частицы; l_D – дебаевская длина; φ_s – поверхностный потенциал частицы в жидкости; ζ – электрокинетический потенциал (зета-потенциал) частицы; кроме того, поверхностный заряд частицы в жидкости $q_1 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 a \zeta$. Относительная диэлектрическая проницаемость, определяемая свойствами клеточной периферии, принята здесь равной $\epsilon = 5$.

Аэрозоль спор грибов приготавливался посредством обдувания воздушной струей зрелого мицелия. Грибы *Penicillium chrysogenum* отбирались из воздуха лабораторного помещения и далее выращивались в колбах Эрленмайера на дрожжевом агаре. Специальное приспо-

собление использовалось для обдувания грибного мицелия непосредственно в колбе. Размер спор принимался равным $2,8 \times 3,0 \text{ мкм}$; плотность принималась равной $0,8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

Некоторые экспериментальные результаты приведены ниже.

1. Исходное состояние воздуха (фон). Измеренный потенциал коллектора составлял $U_m = -6 \text{ В} = -6 \cdot 10^{-3} \text{ В}$; электрический заряд единицы объема в единицах $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ был равен $q_s = 110e$ в кубическом сантиметре.

2. Аэрозоль *Sacch.carlsbergensis*. Измеренный потенциал коллектора $U_m = -4,6 \text{ В}$. Электрический заряд единицы объема воздуха $q_s = 8,6 \cdot 10^4 e$ в кубическом сантиметре; концентрация клеток $N_a = 1,2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$; электрический заряд в расчете на клетку $q_1 = 72e$; электрокинетический потенциал $\zeta = 11,5 \text{ мВ}$ (абсолютная величина); отрицательный поверхностный потенциал клеток в суспензии $\varphi_s = 23 \text{ мВ}$.

3. Аэрозоль спор грибов *P. chrysogenum*. Измеренный потенциал коллектора $U_m = -7 \text{ В}$. Электрический заряд единицы объема воздуха $q_s = 13 \cdot 10^4 e$ в кубическом сантиметре; концентрация спор $N_a = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$; электрический заряд в расчете на одну спору $q_1 = 43e$.

Литература

1. Tchijevsky A.L. The Aeroionification in national-economy. Moscow, Gosplanizdat, 1960;
2. www.un.org/apps/news/story.asp? (Centre News UN);
3. Fucks N.A. Mechanics of Aerosols. Pergamon Press, NY, 1964, p.216;
4. Smirnov W.W. The atmospheric Ions. Proc. of exp. Meteorol. Institute, 1980, №24(89), pp3-28;
5. Zimon A.D. Adhesion of Dust and Powder. Plenum Press, NY 1969;
6. Kirsch A.A., Zagnit'ko A.V. Diffusion charging of submicrometer aerosol particles by unipolar ions. J. Colloid Interface Science. 1981, vol.80, №1, pp.111-117;
7. Cobb W.E., Wells K.I. The electrical conductivity of oceanic air and its correlation to global atmospheric pollution. J. Atm. Sci., 1970, v.27, pp.814-819;
8. Smirnov W.W. The Ionization in Troposphere. St.-Petersburg Hydrometeoizdat, 1992;
9. Control of physical factors of the environment dangerous to person. Under V.N.Krutikov, Yu.I.Bregadze, A.B.Kruglov's Edition. Standards Publishing House. Moscow, 2003;
10. Varekhov A.G. Electric properties of bioaerosol particles. Proc. of the first International symposium on aerosols, vol.2 Atmospheric aerosols. Moscow, 1994. pp. 81-83;

¹Варехов Алексей Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры "Экономика природопользования и сервис экосистем" СПбГУСЭ, моб. +7 911 276 5500, e-mail: varekhov@mail.ru