

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ КАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НИКЕЛЯ

В настоящее время цветная металлургия России занимает лидирующее положение по количеству и разнообразию пылегазовых смесей, подлежащих очистке. Причем наиболее пылящими являются предприятия, производящие никель, медь, что и определяет требования, предъявляемые к технологическим газоочисткам [1].

Общим свойством пылей никелевого производства является отсутствие возгонов, вследствие чего сравнительно крупная пыль достаточно хорошо улавливается. Это объясняется тем, что никелевые руды (как сульфатные, так и окисленные) почти не содержат металлов и их соединений, характеризующихся высокой летучестью [2].

Однако многолетний опыт промышленной эксплуатации пылеулавливающих аппаратов на ОАО «Норильская горная компания» показал, что применение аппаратов фильтрационного принципа действия – тканевых (рукавных, карманных и т. п.) фильтров затруднен из-за высокой температуры точки росы (210–250°C), связанной с высоким содержанием сернистого и серного ангидридов (сернистого – 3...30%, серного – 1...3% от содержания сернистого). Поэтому все технологические системы сухого пылеулавливания агломерационной фабрики были заменены мокрыми на основе средненапорных скрубберов Вентури ($\Delta P = 3000$ Па) с форсуночной подачей орошающей жидкости, скоростью газов в горловине 70–75 м/с и диаметром горловины не более 600 мм.

Системы мокрого пылеулавливания хорошо вписались в технологическую схему, т. к. основное сырье на агломерационную фабрику поступает в виде сгущенной пульпы [3]. Но при этом определились отрицательные стороны:

– вследствие высокой агрессивности очищаемых газов аппараты и газоходы необходимо изготавливать из технически чистого титана марки ВТ 1-0 и ВТ 1-1;

– значительное количество (3...6 г/м³) тонкодисперсных (менее 20 мкм) аэрозолей конденсации серной кислоты, плохо улавливаемых меха-

ническими каплеуловителями, выбрасывается в атмосферу;

– разрушаются футерованные кирпичом, железобетонные и стальные поверхности газоходных трактов, а также наружные поверхности зданий и сооружений – кровли, стены, на которые воздействуют аэрозоли конденсации серной кислоты;

– наносится большой экологический ущерб окружающей среде как полуострова Таймыр, так и всего Красноярского края и Севера в целом.

Все это приводит к значительным финансовым и материальным затратам. Так, только на ремонт кровли и футерованного коллектора агломерационной фабрики в 1996 г. было израсходовано более 5 млрд. руб. (в ценах 1996 г.), периодичность же ремонта составляет 5-7 лет.

Для снижения каплеуноса необходима интенсификация процесса улавливания. Высокую эффективность обеспечивает применение мокрых электрофильтров. Однако их применение не всегда оправдано экономически из-за высоких капитальных и эксплуатационных затрат вследствие низкой (1-2 м/с) скорости фильтрации [4]. Представляется целесообразной предварительная электризация капель, широко применяемая в процессах пылеулавливания. Благодаря эффекту коагуляции в электрическом поле капли, укрупненные до размеров более 20 мкм, эффективно улавливаются в инерционных механических каплеуловителях. Данное предположение легло в основу разработанной ОАО «НГК» совместно с Белгородской государственной технологической академией строительных материалов конструкции мокрого инерционного электростатического фильтра (МИЭФ), в котором заряженный в высоковольтном ионизаторе капельный аэрозоль осаждается в жалюзийном каплеуловителе (рис. 1).

Основу математической модели предложенного способа очистки составили уравнения движения, зарядки и коагуляции капельного аэрозоля в ионизаторе и осаждения их в жалюзийном каплеуловителе.

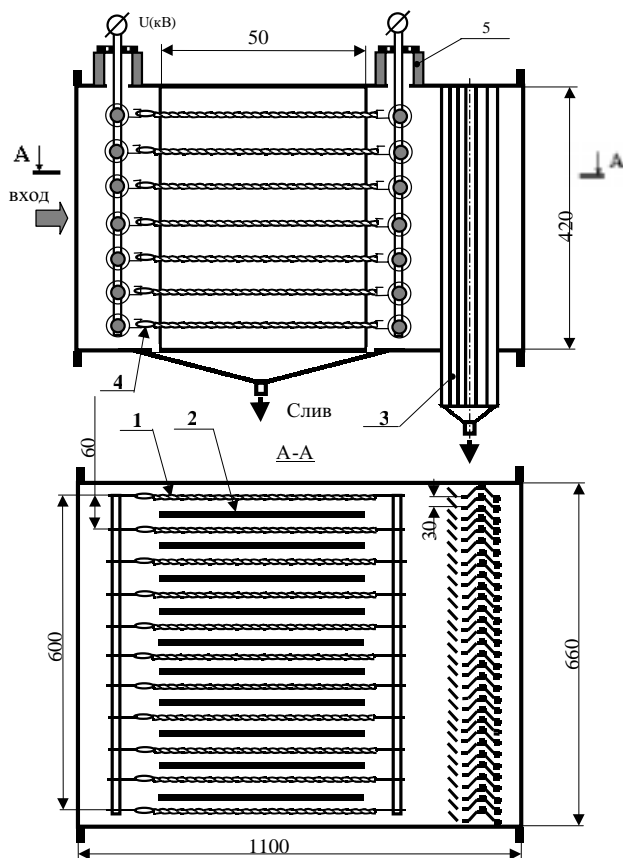


Рис. 1. Схема опытно-промышленной установки МИЭФ
 1 – электрод коронирующий; 2 – электрод осадительный;
 3 – каплеуловитель жалюзийный; 4 – ионизатор;
 5 – изолятор.

Уравнения движения капель в электрическом поле имеют вид [4-7]:

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{V}, \quad (1)$$

$$\frac{d(m\vec{V})}{dt} = -\frac{\rho d^2}{8} C_{c,r} |\vec{U} - \vec{V}| (\vec{U} - \vec{V}) + m\vec{g} + \vec{E}(q_1 + q_2), \quad (2)$$

где \vec{R} – радиус-вектор капли, м;
 \vec{U} , \vec{V} – векторы скорости газа и капли, м/с;
 \vec{E} – вектор напряженности электрического поля, В/м;
 \vec{g} – вектор ускорения свободного падения, м/с²;
 m – масса капли, кг;
 δ – диаметр капли, мкм;
 c_{r} – плотность газа, кг/м³;
 q_1 , q_2 – ударная и диффузионная составляющие заряда капли, Кл;
 C – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Зарядка капель аэрозоля происходит во время их движения. Уравнения кинетики зарядки (ударный и диффузионный механизм) имеют вид:

$$\frac{dq_1}{dt} = \frac{kc_u q_m}{4e_0} \left(1 - \frac{q_1}{q_m}\right)^2, \quad q_1 \leq q_m, \quad (3)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = \frac{kc_u q_2}{e_0 \left[\exp\left(\frac{kq_2}{2\rho e_0 d D}\right) - 1 \right]}, \quad (4)$$

где k – подвижность ионов, м²/Вс;
 ρ_u – плотность объемного заряда, Кл/м³;
 e_0 – электрическая постоянная, Ф/м;
 $q_m = 3\rho e_0 d^2 E$ – максимальный заряд капли, Кл;
 D – коэффициент диффузии ионов, м²/с.

Во время движения в результате коагуляции в электрическом поле счетная концентрация капель n сокращается, а их размер увеличивается:

$$\frac{dn}{dt} = -K \left(1 + 2D\sqrt{\frac{d}{Kt}}\right), \quad (5)$$

$$\frac{d(d)}{dt} = \frac{Kd}{3} n \left(1 + 2D\sqrt{\frac{d}{Kt}}\right), \quad (6)$$

$$K = k_{\text{тур}} + k_{\text{гр}} + k_{\text{к}} + k_{\text{е}}, \quad (7)$$

где K – константа коагуляции.

В рассматриваемых условиях основными являются следующие типы коагуляции: турбулентная, градиентная, кинематическая, электрическая. Константы соответствующих механизмов коагуляции определялись по формулам [8]:

$$k_{\text{тур}} = 0,001\pi\lambda^{9/8} \frac{\rho_k}{\rho_g} \frac{V_2^{9/4}}{D^{3/4} V_2^{5/4}} \beta \delta_k^4, \quad (8)$$

$$k_{\text{гр}} = \frac{32}{3} \Gamma_{c2} \delta_k^3, \quad (9)$$

$$k_{\text{к}} = 0,1596\rho_{\text{вз}} \frac{e_0 E^2 D_3^2}{M_T}, \quad (10)$$

$$k_{\text{е}} = \frac{\nu \rho e_0 E^2 d_{\text{ч}}^3 C_{\text{к}}}{18M_T}, \quad (11)$$

где $\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\text{Re}_D}}$ – коэффициент сопротивления трения,

$$\text{Re}_D = \frac{V_T D}{\eta_T};$$

D – эквивалентный диаметр канала, м;

V_T – скорость газа в канале, м/с;

η_T – коэффициент кинематической вязкости газа;

$\nu = \frac{\rho e_0 E^2 D_3^3}{24k_d T_T}$ – коэффициент ускорения, возникающего в результате ориентации частиц аэро-

золь продольной осью параллельно направлению поля;

D_3 – диаметр зоны коагуляции, м;

k_d – постоянная Больцмана;

T_r – температура газа;

η_3 – коэффициент эффективности инерционного сближения капель:

$$\eta_3 = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,35)^2}, \quad Stk = \frac{\rho_k \bar{\delta}_k V_{отн}}{18\mu_c};$$

$\bar{\delta}_k$ – средний размер капли, мкм;

$V_{отн}$ – относительная скорость капель разных размеров, м/с;

C_k – постоянная Кенингема,

ρ_k – плотность капельного аэрозоля, кг/м³

Исследование влияния механизмов коагуляции показали, что наибольшее воздействие оказывают электрическая и кинематическая коагуляции, увеличивающиеся с ростом напряженности электрического поля. Турбулентная коагуляция из-за малости перехода энергии движущегося потока в пульсации не оказывает существенного влияния на состояние аэрозоля в целом. Градиентная коагуляция ограничена тонким пристенным слоем и тоже не оказывает значимого влияния на весь массив аэрозоля.

Для определения необходимой степени коагуляции капель был найден минимальный размер капель, осаждаемых в жалюзийном каплеуловителе:

$$\delta_{min} = \sqrt{\frac{18\mu a l}{V(\rho_k - \rho_c) L \sin \alpha}}, \quad (12)$$

где a – ширина газового потока на входе в жалюзийный канал, м;

V – скорость газового потока, м/с;

L – длина осадительной плоскости, м;

l – длина траектории осаждения капли, м;

α – угол встречи газа с плоскостью осаждения, град.

Эффективность работы МИЭФ складывается из эффективности высоковольтного ионизатора и жалюзийного каплеуловителя:

$$z_{МИЭФ} = z_{ВИ} + (1 - z_{ВИ}) z_{ЖК}, \quad (13)$$

$$z_{ВИ} = 1 - \exp\left(-\frac{V_{др} LP}{VS} (0,3 - 0,32i)\right), \quad (14)$$

$$z_{ЖК} = 1 - \exp\left(-\frac{V d_k^2 (c_k - c_r)}{36 h_M}\right), \quad (15)$$

где $\eta_{МИЭФ}$, $\eta_{ВИ}$, $\eta_{ЖК}$ – эффективности работы МИЭФ, высоковольтного ионизатора и жалюзийного каплеуловителя;

L , P – длина и активный периметр, м;

S – активная площадь поперечного сечения осадительных электродов, м²;

V – скорость газа в ионизаторе или каплеуловителе, м/с;

d_k – диаметр капли, мкм;

h – ширина жалюзийного канала в каплеуловителе, м;

i – плотность тока, А/м.

Формула скорости дрейфа капли к осадительному электроду имеет вид:

$$V_{др} = \frac{qE}{3\pi\mu d_k} \left(1 + \frac{A\lambda}{d_k}\right), \quad (16)$$

где $A \approx 0,86$ (для атмосферного воздуха) – безразмерный параметр;

λ – средняя длина пробега молекул газовой среды, м;

q – заряд капли, Кл.

Полученная система уравнений (1-11) вместе с начальными и граничными условиями решалась методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Созданный комплекс программ в среде визуальной разработки приложений Delfi-4.0 позволил провести численные эксперименты и изучить влияние всевозможных параметров системы на эффективность работы МИЭФ. Программный комплекс позволяет не только моделировать работу МИЭФ в разных условиях, но и изучать процессы коагуляции, работу высоковольтного ионизатора и жалюзийного каплеуловителя отдельно. Например, проследить рост капель аэрозоля на выходе из ионизатора (рис. 2) или рост заряда капель (рис. 3). При необходимости можно оценить траекторию движения капли в жалюзийном каплеуловителе, изучая ее движение из разных точек попадания в жалюзийный канал (рис. 4). Достоверность результатов расчетов обеспечивалась сравнением с данными экспериментов, полученных на полупромышленной установке.

Проведение поисковых экспериментов и анализ работы промышленных установок позволил определить основные конструктивные и технологические параметры, оказывающие определяющее влияние на эффективность работы МИЭФ. К ним относятся:

1) напряжение на коронирующих электродах, U , кВ;

2) скорость воздушного потока в сечении ионизатора и каплеуловителя, V , м/с;

3) входная концентрация капельного аэрозоля, $Z_{вх}$, г/м³;

4) длина зарядного поля, L , м;

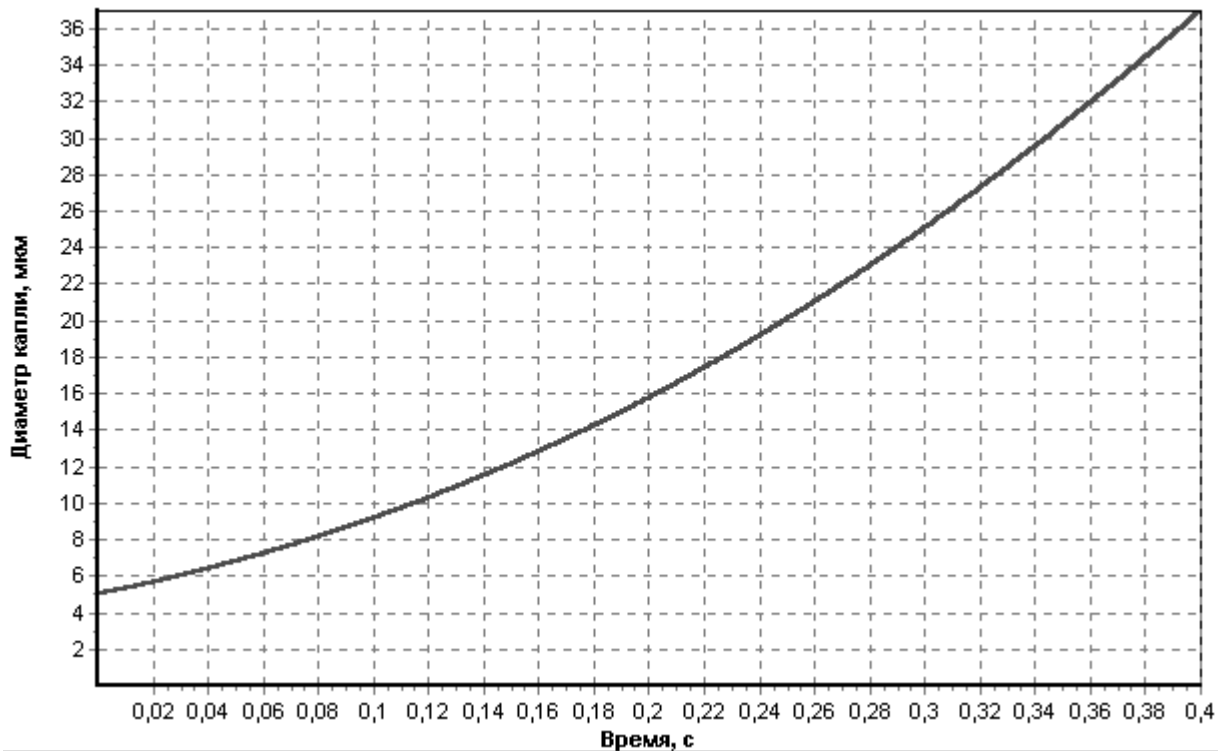


Рис. 2. Рост медианного размера капли в ионизаторе

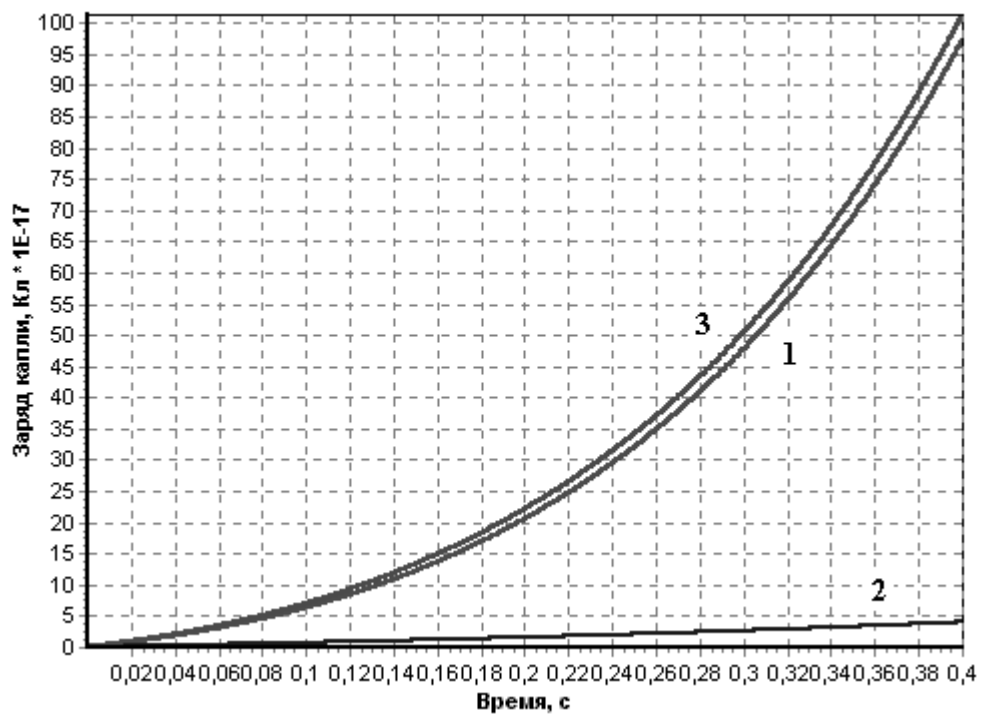


Рис. 3. Рост заряда капли в ионизаторе:
 1 – полевого заряд;
 2 – диффузионный заряд;
 3 – суммарный заряд.

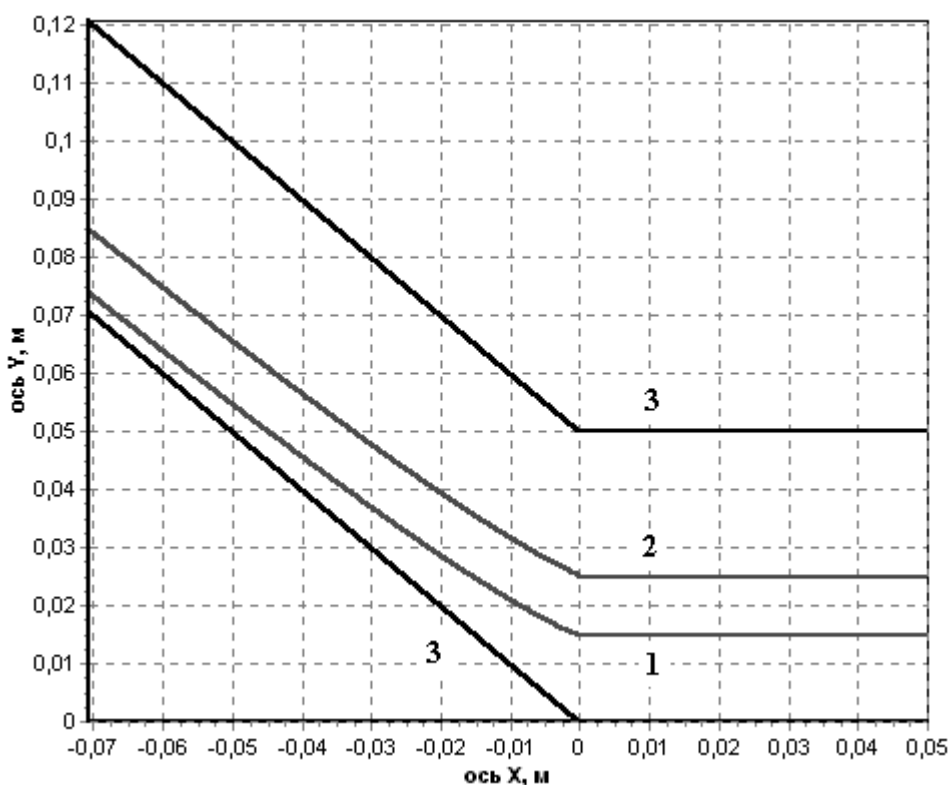


Рис. 4. Траектория движения капли в жалюзийном каплеуловителе:

- 1 – траектория капли;
- 2 – линия газового потока;
- 3 – стенка каплеуловителя.

5) критическое напряжение, U_0 , кВ;

6) средняя скорость движения газовой среды, V_{cp} , м/сек;

7) плотность капель, ρ_k , г/м³;

8) межэлектродное расстояние, Н, м.

В результате была определена функция отклика для \hat{z} – эффективности улавливания капельного аэрозоля:

$$\hat{z} = \Phi(U, V, Z_{вх}, L, U_0, V_{cp}, c_k, H).$$

Для минимизации числа опытов применялись методы матричного планирования многофакторного эксперимента. В основу был положен центральный композиционный ротатбельный план (ФКРП). Была выполнена 31 серия (по 6 опытов в каждой) опытов.

Анализ полученных зависимостей эффективности работы МИЭФ от основных факторов выявил ряд особенностей:

1. Эффективность увеличивается с ростом длины зарядного поля, но эта зависимость носит нелинейный характер: имеется четкий минимум степени очистки в интервале длин поля 0,8-1,2 метра; в дальнейшем с ростом длины зарядного

поля и увеличения времени пребывания заряженных частиц в поле коронного заряда степень очистки растет.

2. Увеличение напряжения положительно сказывается на росте степени очистки, причем это особенно заметно при изменении скорости движения капельного аэрозоля с 7 м/сек до 11 м/сек; при меньших скоростях степень очистки значительно меньше.

3. Увеличение входной концентрации капельного аэрозоля слабо влияет на увеличение степени очистки для всех значений напряжения на коронирующих электродах.

Выводы

1. В результате теоретических и промышленных исследований была уточнена математическая модель движения, зарядки и осаждения капельного аэрозоля в МИЭФ, учитывающая увеличение размеров капель в результате коагуляции и уменьшение счетной концентрации.

2. На ее основе разработан комплекс программ автоматизированного расчета эффективности МИЭФ на ПЭВМ.

3. Проведенные вычислительные эксперименты показали высокую степень сходимости экспериментальных и расчетных данных.

4. МИЭФ был принят для внедрения на пред-

приятиях ОАО «Норильская горная компания». Применение МИЭФ позволит сократить выбросы капельного аэрозоля серной кислоты на 11170 т/год, а выброс пыли – на 250 т/год.

Список использованной литературы:

1. Гордон Г.М., Пейсахов И.Л. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1977.
2. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве. М.: Металлургия, 1990.
3. Денисов С.И. Улавливание и утилизация пылей и газов. М.: Металлургия, 1991.
4. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Ремизов И.И. Очистка промышленных газов от пыли. М.: Химия, 1981.
5. Вальберг А.Ю., Данилин В.В., Кириш Е.В., Янковский С.С. Сухие и мокрые методы очистки газов с предварительной зарядкой пыли. Обз. Инф. Пром. и сан. Очистка газов (серия ХМ-14). М.: Финтихимнефтемаш, 1983.
6. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980.
7. Куцев Л.А., Шаптала В.Г., Карпман В.Б., Сляднев А.И. Исследования процесса осаждения капельного аэрозоля в инерционных и электрических полях // Труды Международной научно-технической конф. «Высокие технологии в экологии», часть 1. Воронеж, 1998. С. 66-69.
8. Карпман В.Б., Шаптала В.Г., Куцев Л.А. Особенности коагуляции капельного аэрозоля в поле коронного разряда // Международный научно-практический конф. (Белгород, 3-5 октября 2000 г.). Белгород: изд. БелГТАСМ, 2000. С. 67.