

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УЛАВЛИВАНИЯ КАПЕЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ В СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АППАРАТАХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Л.А. Куцев, В.Г. Шантала, Г.Л. Окунева, В.Б. Карман, М.В. Анфалов

Цветная металлургия России, занимая по общему количеству пылевых выбросов в атмосферу четвертое место после теплоэнергетики, промышленности строительных материалов и черной металлургии, является лидером по разнообразию пылегазовых смесей, подлежащих очистке [1]. Причем наиболее пылящими являются предприятия, производящие никель и медь. Пирометаллургическое производство никеля осуществляется по следующей технологии (рис 1):



Рис 1 Технологическая схема получения никеля

- Обогащение руды и получение концентрата;
- Агломерация концентрата, заключающаяся в его сушке и выжигании части серы, содержащейся в сырье;
- Получение штейна из агломерата в рудно-термических печах, печах взвешенной плавки и др.;
- Получение фаинштейна в конверторах;
- Получение анодного никеля в электрических печах различной конструкции.

Производство меди осуществляется по такой же технологии за исключением процесса агломерации. Вся сера выжигается при плавке концентрата сначала в печах Ванюкова или отражательных печах и далее в конверторах.

Самыми крупными предприятиями цветной металлургии являются ОАО "Норильская горная компания"; АО "Североникель" и "Печенганикель"; медный завод в г. Ревда Свердловской области

Аэрозоли, содержащиеся в промышленных газах пирометаллургического производства никеля и меди, имеют различные физико-химические свойства и технологические параметры. Пылеулавливающие аппараты рассчитываются на работу при оптимальных параметрах пылегазовой смеси (температуре газов, их запыленности, дисперсности, плотности и других свойствах частиц), лежащих в сравнительно узком диапазоне. Поэтому для обеспечения эффективной очистки газов необходимо произвести подготовку очищаемых газов, чтобы их параметры соответствовали характеристикам используемых пылеулавливающих аппаратов [2].

Одним из основных факторов, определяющих состав аппаратов, входящих в наиболее крупные – технологические системы пылеулавливания, как по конструкции, так

и по принципу действия является высокая точка росы ~ 210...250 °С. Данный фактор, связанный с высоким содержанием сернистого и серного ангидридов (сернистого – 3...30 %, серного ангидрида – 1...3 % от содержания сернистого), практически исключил применение аппаратов фильтрационного принципа действия – тканевых (рукавных, карманных и т.п.) фильтров. Кроме того склонность к зарастанию вследствие высокой влажности исходного концентрата и низкая эффективность пылеулавливания, 60...70 %, предопределили полную замену всех аппаратов на агломерационной фабрике ОАО «Норильская горная компания» системами мокрого пылеулавливания. Все технологические системы пылеулавливания были спроектированы 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 вписываются в технологические схемы основного производства, т.к. технологическое сырье на предприятия поступает в виде сгущенной пульпы и уловленные продукты обрабатываются в технологических сгустителях совместно с сырьем.

Однако при этом применение систем мокрого пылеулавливания сопровождается выбросом значительного количества ($3...6$ г/м³) аэрозолей серной кислоты, разрушающей газоходы, а также поверхности зданий и сооружений. Кроме того, наносится значительный экологический ущерб окружающей среде.

Для снижения каплеуноса необходима интенсификация процесса каплеулавливания. Одним из основных способов подготовки газов к очистке является коагуляция частиц с помощью различных механизмов [2, 3]. Необходимость коагуляции очевидна при сравнении удельных энергозатрат, потребных для улавливания аэрозолей различной дисперсности (рис. 2). Как следует из приведенной диаграммы, на улавливание аэрозолей размером 0,1 мкм требуется ~ в 50 раз больше энергозатрат, чем для улавливания частиц размером 10 мкм.

Капельные аэрозоли конденсации мокрых газоочисток агломашин и электродуговых печей никелевого производства имеют размер 0,2...5 мкм, что соответствует заштрихованной области (рис. 2). Капли такого размера эффективно улавливаются высоконапорным скруббером Вентури и мокрым электрофильтром, однако энергозатраты при этом настолько велики, что этот способ практически неприменим. Применение мокрого электрофильтра ограничено его сравнительно низкой производительностью по газу и высокими капитальными затратами.

Таким образом, представляется целесообразной предварительная электрическая зарядка капель и их коагуляция под воздействием различных механизмов. Укрупненные капли будут эффективно улавливаться в простом и скоростном инерционном жалюзийном каплеуловителе, отличающемся высокой экономичностью.

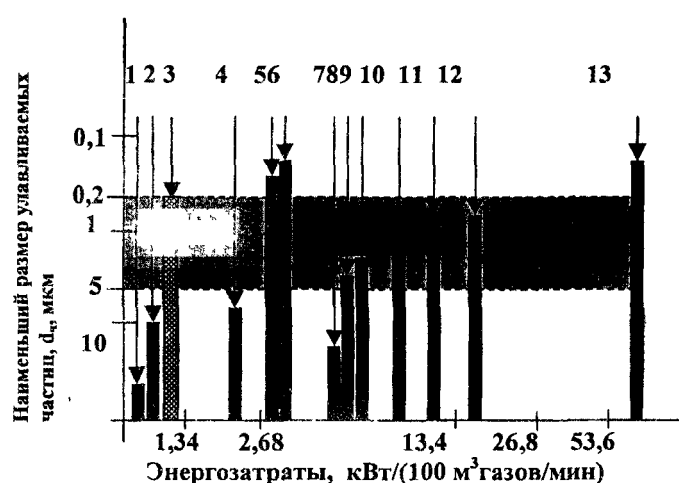


Рис. 2. Зависимость минимального размера частиц, улавливаемых в пылеуловителях, от энергозатрат: 1 – осадительная камера; 2 – инерционные пылеуловители; 3 – МИЭФ; 4 – оросительная камера; 5 – электрофильтр; 6 – рукавный фильтр; 7 – циклон; 8 – мокрый циклон; 9 – полый форсуночный скруббер; 10 – газопромыватель ударно-инерционного действия; 11 – дисковый скруббер; 12 – низконапорный скруббер Вентури; 13 – высоконапорный скруббер Вентури.

Нами разработан МИЭФ (мокрый инерционный электростатический фильтр), сочетающий эффекты предварительной коагуляции в неоднородном электрическом поле коронного разряда и инерционного каплеулавливания, который позволит эффективно улавливать капельные аэрозоли указанного размера. Конструкция аппарата защищена патентом РФ. На данной диаграмме МИЭФ будет находиться в области 3. Аппарат представлен на рис. 3.

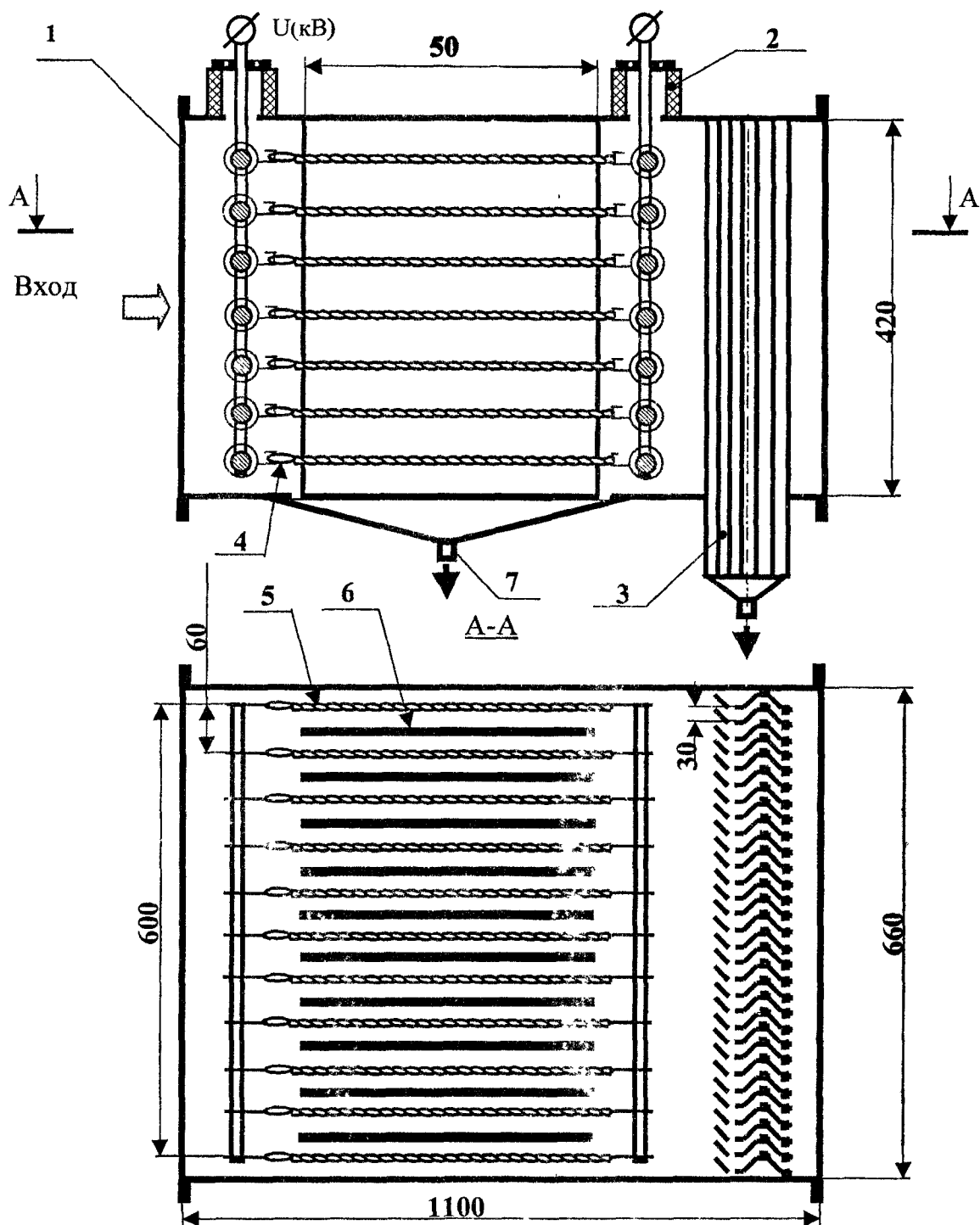


Рис. 3. Мокрый инерционный электростатический фильтр (МИЭФ):
 1 – высоковольтный ионизатор; 2 – высоковольтный изолятор;
 3 – каплеуловитель жалюзийный; 4 – амортизатор; 5 – электрод коронирующий;
 6 – электрод осадительный; 7 – гидрозатвор.

По экспериментальным данным энергозатраты работы аппарата складываются из затрат:

- на электризацию капельного аэрозоля в высоковольтном ионизаторе – 0,55 – 0,86 кВт/(100 м³ газов/мин);
- на преодоление гидравлического сопротивления высоковольтного ионизатора – 0,03 – 0,05 кВт/(100 м³ газов/мин);
- на преодоление гидравлического сопротивления при каплеулавливании в жалюзийном каплеуловителе – 0,2 – 0,32 кВт/(100 м³ газов/мин).

В сумме энергозатраты МИЭФ составляют 0,78 – 1,22 кВт/(100 м³ газов/мин).

Для изучения физических процессов, происходящих в МИЭФ нами была разработана математическая модель, на основе которой создан комплекс программ, обеспечивающий автоматизированный расчет аппарата.

Основу математической модели предложенного способа очистки представляют дифференциальные уравнения движения, кинетики зарядки и коагуляции капельного аэрозоля в высоковольтном ионизаторе и осаждения в скоростном жалюзийном каплеуловителе [4-5]. В рассматриваемых условиях основными являются следующие типы коагуляции: турбулентная, градиентная, кинематическая и электрическая. Были получены уточненные формулы констант коагуляции. В результате коагуляции средний размер капель, а значит и их масса будут увеличиваться, что скажется на их зарядке в поле коронного разряда.

При разработке математической модели улавливания твёрдых и жидких частиц исходим из следующих допущений:

- дисперсная фаза аэрозоля состоит из капель орошающей жидкости и твёрдых частиц, покрытых плёнкой этой жидкости;
- в результате конденсации паров и слияния с каплями размеры частиц растут и их поведение становится практически таким же, что и капель жидкости равных размеров;
- частицы аэрозоля имеют сферическую форму;
- аэрозоль считается монодисперсным;
- испарение капель жидкости не учитывается;
- распределение частиц по размерам является самосохраняющимся (прирост частиц данного размера уравновешивается их потерями за счёт коагуляции и осаждения);
- поток аэрозоля считается турбулентным и обуславливает равномерное распределение частиц в поперечном сечении газового потока;
- капли жидкости считаются проводящими;
- полный заряд капель вычисляется как сумма зарядов, рассчитанных отдельно по уравнениям ударной и диффузионной зарядки;
- влиянием объёмного заряда капель и движением молекул газа в поперечном направлении пренебрегаем;
- подвижность ионов в межэлектродном пространстве считается постоянной;
- вторичный унос капель жидкости с поверхности осаждения не учитывается.

Уравнение движения капель в электрическом поле имеют вид:

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

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

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; ρ_r – плотность газа, кг/м³; q_1 , q_2 –

ударная и диффузионная составляющие заряда капли, Кл; С – коэффициент аэродинамического сопротивления.

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

$$\frac{dq_1}{dt} = \frac{k\rho_u q_m}{4\varepsilon_0} \left(1 - \frac{q_1}{q_m}\right)^2, \quad q_1 \leq q_m, \quad (3)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = \frac{k\rho_u q_2}{\varepsilon_0 \left[\exp\left(\frac{kq_2}{2\pi\varepsilon_0 \delta D}\right) - 1 \right]}, \quad (4)$$

где k – подвижность ионов, м²/Вс; ρ_u – плотность объемного заряда, Кл/м³; ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м; $q_m = 3\pi\varepsilon_0 d^2 E$ – максимальный заряд капли, Кл; D – коэффициент диффузии ионов, м²/с.

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

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

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

$$K = k_{\text{тур}} + k_{\text{Гр}} + k_{\text{К}} + k_{\text{Е}}, \quad (7)$$

где K – коэффициент коагуляции.

В рассматриваемых условиях основными являются следующие типы коагуляции: турбулентная, градиентная, кинематическая, электрическая. Коэффициенты соответствующих механизмов коагуляции определялись по формулам [6]:

$$k_{\text{тур}} = 0,001\pi\lambda^{9/8} \frac{\rho_u}{\rho_r} \frac{V_r^{3/4}}{D^{3/4} V_r^{5/4}} \beta \bar{\delta}_c^4, \quad (8)$$

$$k_{\text{Гр}} = \frac{32}{3} \Gamma_{\text{сг}} \bar{\delta}_c^3, \quad (9)$$

$$k_{\text{К}} = 0,1596\pi\beta\eta_3 \frac{\varepsilon_0 \Gamma_c^2 D_3^2}{\mu_r}, \quad (10)$$

$$k_{\text{Е}} = \frac{\beta\pi\varepsilon_0 E^2 \bar{\delta}_c^3 C_{\text{к}}}{18\mu_r}, \quad (11)$$

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

D – эквивалентный диаметр канала, м; V_r – скорость газа в канале, м/с; ν_r – коэффициент

кинематической вязкости газа; $\beta = \frac{\pi\varepsilon_0 E^2 D^3}{24k_{\delta} T_r}$ – коэффициент ускорения, возникающего в

результате ориентации частиц аэрозоля продольной осью параллельно направлению поля;

D_3 – диаметр зоны коагуляции, м; k_{δ} – постоянная Больцмана; T_r – температура газа;

η_3 – коэффициент эффективности инерционного сближения капель: $\eta_3 = \frac{\text{Stk}^2}{(\text{Stk} + 0,35)^2}$,

$$Stk = \frac{\rho_{\text{ч}} \bar{\delta}_{\text{ч}} V_{\text{отн}}}{18\mu_{\text{г}}}; \bar{\delta}_{\text{ч}} - \text{средний размер частиц, мкм};$$

$V_{\text{отн}}$ – относительная скорость частиц разных размеров, м/с, $C_{\text{к}}$ – постоянная Кенингема.

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 капле был найден минимальный размер капле, осаждаемых в жалюзийном каплеуловителе:

$$\delta_{\text{min}} = \sqrt{\frac{18\mu_{\text{ал}}}{V(\rho_{\text{л}} - \rho_{\text{г}})L \sin \alpha}}, \quad (12)$$

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 [7]:

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

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

$$\eta_{\text{ЖК}} = 1 - \exp\left(-\frac{Vd_{\text{к}}^2(\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{г}})}{36h\mu}\right), \quad (15)$$

$$V_{\text{др}} = \frac{qE}{6\pi\mu_{\text{г}}}\left(1 + \frac{A\lambda}{r_{\text{к}}}\right), \quad (16)$$

где $\eta_{\text{МИЭФ}}$, $\eta_{\text{ВИ}}$, $\eta_{\text{ЖК}}$ – эффективности работы МИЭФ, высоковольтного ионизатора и жалюзийного каплеуловителя; $V_{\text{др}}$ – скорость дрейфа капли к осадительной плоскости, м/с; L , P – длина и активный периметр, м; S – активная площадь поперечного сечения осадительных электродов, м^2 ; V – скорость газа в ионизаторе или каплеуловителе, м/с; q – заряд капли, Кл; $r_{\text{к}}$, $d_{\text{к}}$ – радиус и диаметр капли, мкм; h – ширина жалюзийного канала в каплеуловителе, м; $A \approx 0,86$ (для атмосферного воздуха) – безразмерный параметр; λ – средняя длина пробега молекул газовой среды, м; i – плотность тока, А/м.

Полученная система уравнений (1-11) вместе с начальными и граничными условиями решалась методом Рунге-

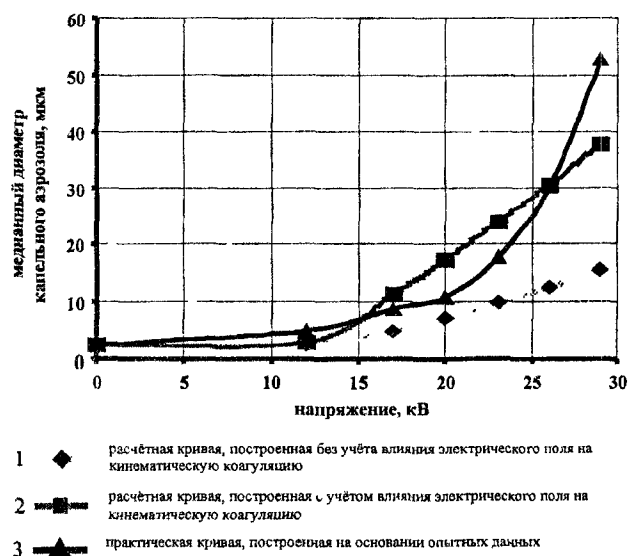


Рис.4. Зависимость крупности капельного аэрозоля от коронирующего напряжения.

Кутта четвертого порядка точности. Созданный комплекс программ в среде визуальной разработки приложений Delphi-7.0 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.

Проведенные вычислительные эксперименты показали хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных. На рис. 4. построены графики зависимости крупности капельного аэрозоля от коронирующего напряжения, полученные на основании опытных данных и теоретических расчетов. Значения кривых близки, различаются по величине не более чем на 20%.

Выполнение вычислительного эксперимента и анализ работы промышленных установок позволили 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/сек;
- 3) входная концентрация капельного аэрозоля, $Z_{вх}$, г/м³;
- 4) длина зарядного поля, L , м;
- 5) критическое напряжение, U_0 , кВ;
- 6) средняя скорость движения газовой среды, $V_{ср}$, м/сек;
- 7) плотность капель, ρ_k , г/м³;
- 8) межэлектродное расстояние, H , м.

В результате определена функция отклика для η – эффективности улавливания капельного аэрозоля: $\eta = \Phi(U, V, Z_{вх}, L, U_0, V_{ср}, \rho_k, H)$. Для минимизации числа опытов применялись методы матричного планирования многофакторного эксперимента. В основу был положен центральный композиционный ротатабельный план (ЦКРП). Была выполнена 31 серия (по 6 опытов в каждой) опытов.

Анализ полученных зависимостей эффективности работы МИЭФ от основных параметров 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.

При изучении работы высоковольтного ионизатора проводился сравнительный анализ для наиболее распространенных электродных систем:

- 1) коаксиальные цилиндры;
- 2) один провод между пластинами;
- 3) ряд проводов между параллельными пластинами.

Расчеты подтвердили, что система «ряд проводов между параллельными пластинами» обеспечивает более высокую напряженность электрического поля.

Промышленные испытания МИЭФ проводились на газах агломашины типа АКМ-5-75 № 5 агломерационной фабрики ОАО «НГК». Площадь спуска агломашины составляет 75 м².

Испытываемая промышленная (рис. 5) установка производительностью 10000 м³/ч состояла из водоежекционного скруббера Вентури (ЭСВ), коленного каплеуловителя (КК) и мокрого инерционного электростатического фильтра (МИЭФ), установленных на полочном сгустителе. ЭСВ прямоугольного сечения, имеющая горловину размером 250×750 мм и высотой 750 мм, орошается 3 центробежно-струйными форсунками диаметром 30 мм. Орошение производилось насосом, в рециркуляционном режиме в количестве ~ 140 м³/час. Орошающая жидкость, обогащенная уловленными в установке твердыми и капельными аэрозолями, попадала в сгуститель. После сгущения условно чистая жидкость поступала в бак питания рециркуляционного насоса, а песковый слив направлялся в технологическую емкость.

Высокоэффективный коленный каплеуловитель специальной конструкции обеспечивал содержание капельного аэрозоля на входе в МИЭФ на уровне, соответствующем работе АТУ-5 без подогрева технологических газов.

Промышленные испытания, проведенные на газах агломашины №5 агломерационной фабрики ОАО «Норильская Горная Компания» показали высокую эффективность установки. При длине зарядного поля всего 0,5 м и скорость 6,3 м/с, эффективность пылеулавливания составила 88%. При этом среднемедианный размер пыли на выходе установки уменьшился с 5 мкм до 3 мкм. По расчетам применение МИЭФ позволит сократить выбросы капельного аэрозоля серной кислоты 11170 т/год, а выброс пыли – на 250 г/год, что заметно улучшит экологическую обстановку в промышленном районе г. Норильска. Мокрый инерционный электростатический фильтр (МИЭФ) прост в изготовлении и надежен в эксплуатации. Рекомендуется применение МИЭФ в системах мокрого пылеулавливания предприятий черной и цветной металлургии, химических предприятий и предприятий строительных материалов.

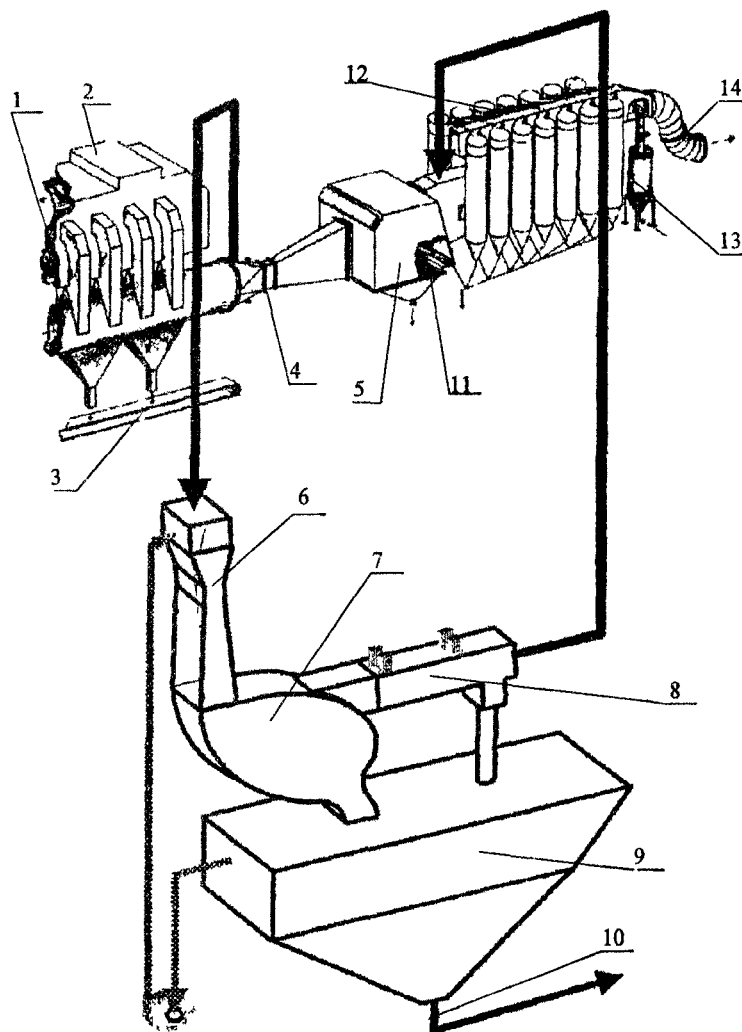


Рис. 4. Схема промышленной установки:

- 1 – агломашина; 2 – горн; 3 – транспортер просора; 4 – щелевой скруббер Вентури газоход грязного газа; 5 – бункер – промежуточный каплеуловитель; 6 – скруббер Вентури; 7 – коленный каплеуловитель; 8 – мокрый инерционный электростатический фильтр; 9 – сгуститель; 10 – песковый слив; 11 – сепаратор; 12 – 14 скрубберов ЦСВТИ Ø1500; 13 – газовая горелка – подогреватель технологических газов; 14 – газоход чистого газа

Библиографический список

1. Гордон, Г. М. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии [Текст] / Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов. – М. : Металлургия, 1977. – 456 с.
2. Ужов, В. Н. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков, И. К. Решидов. – М. : Химия, 1981. – 390 с.
3. Старк, С. Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве [Текст] / С. Б. Старк. – М. : Металлургия, 1990. – 400 с.
4. Кушев, Л. А. Энергосберегающие аппараты для улавливания твердой и жидкой фазы аэрозолей [Текст] / Л. А. Кушев. – Белгород : Логия, 2002. – 187 с.
5. Кушев, Л. А. Автоматизированный метод расчёта энергосберегающих аппаратов мокрой газоочистки при производстве никеля [Текст] / Л. А. Кушев, Г. Л. Окунева, М. В. Анфалов // *Фундаментальные проблемы металлургии : Вестник УГТУ-УПИ*. – 2003. – № 5 (20). – С. 113-117.
6. Эльтерман, В. М. Вентиляция химических производств [Текст] / В. М. Эльтерман. – М. : Химия, 1980. – 288 с.
7. Кушев, Л. А. Повышение эффективности очистки исходящих газов при производстве никеля [Текст] / Л. А. Кушев, В. Г. Шаптала, В. Б. Карпман // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2002. – № 7. – С. 29-32.

УДК 621.9.06

ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

А. Л. Литвинов

Характерной особенностью современного производства является уменьшение размеров партий выпускаемых изделий, сокращение сроков их выпуска. Преобладающим типом производства, особенно в приборостроении и машиностроении, становится мелкосерийное, наиболее прогрессивной формой организации которого является групповое производство. Групповое производство служит организационной основой для построения гибких производственных систем (ГПС), являющихся совокупностью в разных сочетаниях оборудования с числовым программным управлением, роботизированных технологических комплексов, станков с числовым программным управлением и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени, обладающая свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах их характеристик.

Технологической основой создания ГПС является групповая технология, при которой для проектирования системы используются усредненные характеристики выбранных деталей-представителей или сформированных комплексных деталей, объединяющих конструктивно-технологические параметры номенклатуры деталей, предназначенных для обработки на ГПС по групповым технологическим процессам, и расчеты ведутся по средним значениям основных параметров [2]. Правильность принятых проектных решений в конечном итоге проверяется практикой. Однако на практике можно проверить уже полностью спроектированную и изготовленную систему. Если же обнаруживается неправильность или неэффективность проектного решения, то процесс проектирования необходимо повторить. Очевидна нерациональность такого процесса создания ГПС как по времени, так и по затратам ресурсов. Именно поэтому одним из важнейших и обязательных этапов проектирования ГПС является моделирование, которое позволяет имитировать практическую апробацию системы, а сам процесс проектирования совмещен с научными исследованиями над соответствующими моделями.

При выборе типов моделей следует учитывать ряд особенностей функционирования ГПС: во-первых, для множества деталей-операций, выполняемых отдельными видами оборудования, требуется определенное обслуживание на том или ином рабочем месте. В связи с этим их нельзя задать перечислением элементов множества, поскольку априорно