



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 621.311:631.783.2

С.В. Карпов, В.В. Радюшин, Э.Н. Сабуров, Г.А. Шепель

Карпов Сергей Васильевич родился в 1945 г., окончил в 1967 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники Архангельского государственного технического университета. Имеет более 200 научных трудов в области исследования теплофизических основ работы циклонных устройств различного технологического назначения.



Радюшин Вячеслав Витальевич родился в 1970 г., окончил в 1992 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и энергетических систем Архангельского государственного технического университета. Имеет около 30 печатных работ в области исследования аэродинамики и сепарационной эффективности электроциклонных устройств.



Сабуров Эдуард Николаевич родился в 1939 г., окончил в 1961 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники, проректор по научной работе Архангельского государственного технического университета, академик Российской и Международной инженерных академий, Российской академии естественных наук, заслуженный деятель науки и техники РФ. Имеет более 600 публикаций в области аэродинамики и конвективного теплообмена в сильно закрученных потоках, их использования для интенсификации процессов теплообмена в аппаратах различного технологического назначения.

**СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
И ВРЕДНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ
ЛЕСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА**

Обобщены результаты исследований, направленных на оптимизацию систем электроснабжения лесоперерабатывающих предприятий, повышение эффективности очистки газовых промышленных выбросов от пыли и аэрозолей с помощью циклонных и электроциклонных сепарационных устройств; даны рекомендации по выбору оптимальных конструктивных и режимных характеристик, обеспечивающих снижение выбросов вредных веществ в атмосферу.

Ключевые слова: лесоперерабатывающий комплекс, качество электроснабжения, реактивная мощность, потери электроэнергии, промышленные выбросы, циклонные пыле-каплеуловители, электроциклонирование, эффективность очистки, энергоэкологическая оптимизация.

На экономичность работы предприятий лесоперерабатывающего комплекса влияют особенности их электрических нагрузок. Территориальная рассредоточенность электроприемников, сравнительно небольшая плотность нагрузки, устаревшее и изношенное энергетическое оборудование, недостаточное оснащение установок средствами компенсации реактивной мощности приводят к относительному росту потерь энергии. Существенное превышение реактивной мощности над активной снижает пропускную способность всех элементов системы электроснабжения, ухудшает качество электроэнергии. Для предприятий деревопереработки характерна значительная неравномерность электропотребления. Электрические распределительные сети имеют значительную протяженность и разветвленность. В целях снижения потерь электроэнергии особое внимание следует уделять выбору типа, мощности и режима работы понижающих трансформаторов цеховых подстанций [1, 6, 7].

На Архангельском ЦБК, Соломбальском ЛДК и ЛДК-4 (г. Архангельск) проведены исследования, направленные на оптимизацию элементов систем электроснабжения, снижение потерь, возникающих при передаче электроэнергии во внутривозовских сетях. Исходными данными служили характеристики графиков активной, реактивной и полной нагрузок трансформаторов цеховых подстанций и отдельных мощных потребителей – коэффициенты заполнения суточного графика (отношение среднесуточной нагрузки к максимальной) и неравномерности графика (отношение минимальной нагрузки к максимальной). Значения этих коэффициентов лежат в пределах 0,60 ... 0,90. Однако в отдельных случаях этот диапазон значительно расширен за счет уменьшения коэффициентов. Например, на АЦБК для трансформатора Т-2 п/ст. 12 (ПХВО) коэффициент заполнения – 0,36, а для Т-3 – 0,48. Это говорит о необходимости определения оптимальной нагрузки трансформаторов и экономически выгодных зон их загрузки [6].

С помощью графика нагрузок определены коэффициенты, характеризующие уровень реактивной нагрузки. Например, нагрузка на РП-20 АЦБК имеет $\cos \varphi_m = 0,71$, чему соответствует $\operatorname{tg} \varphi_m = 0,70$, в то время как нормированный $\operatorname{tg} \varphi$ имеет более низкое значение; на ЛДК-4 уровень реактивной мощности по отношению к активной составляет 115 % ($\cos \varphi = 0,65$ и $\operatorname{tg} \varphi = 1,15$). Это свидетельствует о необходимости проведения работ по оптимизации режимов реактивной нагрузки и компенсации реактивной мощности в сетях электроснабжения предприятий [6].

Энергетические и экономические показатели трансформаторов, установленных на АЦБК (мощность потерь холостого хода и короткого замыкания, напряжение короткого замыкания, ток холостого хода, стоимость трансформаторов), различны. Это осложняет анализ экономически выгодных зон загрузки и определение оптимальных нагрузок.

Полная установленная мощность трансформаторов цеховых подстанций составляет примерно 290 МВ·А, максимальная полная потребляемая комбинатом мощность (при условии $\varphi = 0,50$ и $\cos \varphi = 0,90$) – около

160 МВ·А [3]. При таких показателях средний коэффициент загрузки трансформаторов равен 0,575, что ниже нормативного (0,700), принимаемого в расчетах.

Разработаны рекомендации по замене двух установленных на АЦБК трансформаторов. Расчетные годовые потери в них составляют 7031374 кВт·ч. Замена на трансформаторы меньшей мощности при реконструкции ТП № 5 способствовала снижению годовых потерь на 1229220 кВт·ч. Это реальная экономия электроэнергии, которую можно получить, не считая полученной от снижения платы за основные фонды [6].

Следует отметить высокий уровень реактивной мощности в графиках нагрузки трансформаторов. Цех ДСП ЛДК-4 потребляет реактивную мощность, равную 110 ... 120 % от активной нагрузки. Компенсация реактивной мощности в период максимума нагрузки составляет примерно 0,25 кВ·Ар/кВт, что значительно меньше экономически целесообразной компенсации, равной 0,60 кВ·Ар/кВт. Передача реактивной мощности приводит к возрастанию тока во всех элементах системы «источник–потребитель», что ведет к увеличению потерь мощности на нагрев токопроводов, появлению дополнительных потерь напряжения, загрузке реактивной мощностью элементов электроснабжения. Это требует дополнительных затрат, направленных на увеличение пропускной способности сети, и приводит к увеличению числа элементов сети и их мощности. Для снижения потребляемой реактивной мощности и уменьшения потерь электроэнергии целесообразно снизить продолжительность работы электродвигателей на холостом ходу, заменить электродвигатели с коэффициентом загрузки менее 0,45 на электродвигатели меньшей по номиналу мощности, снизить напряжение электродвигателей, систематически работающих на малой загрузке, производить регулирование напряжения на трансформаторах подстанций, чтобы напряжение электродвигателя соответствовало норме [6].

В целях повышения эффективности очистки газовых промышленных выбросов от аэрозолей и вредных соединений выполнены исследования аэродинамических, сепарационных и теплообменных характеристик циклонных аппаратов при варьировании в широких пределах основных безразмерных геометрических и режимных параметров [2, 4, 5].

Получено расчетное выражение для безразмерного диаметра частиц $\bar{d}_{50} = d_{50}/D_k$, улавливаемых с эффективностью 50 %:

$$\bar{d}_{50} = 1,5 \sqrt{\frac{\bar{f}_{вх}}{\text{Re}_{вх} \bar{w}_{\phi m}^2 (\bar{L}_k^p - \bar{l}_{вых}^n)} \frac{1}{\bar{\rho}_ч - 1} \left[1 - \frac{8}{3} \text{Re}_{вх} \text{Ko}_3 \frac{\bar{L}_k^p - \bar{l}_{вых}^n}{\eta_k} \bar{d}_{ам} \right]}, \quad (1)$$

где $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх} / \pi D_k^2$ – безразмерная площадь входа;

$D_k = 2R_k$ – диаметр рабочего объема циклона;

$\text{Re}_{вх} = v_{вх} D_k / \nu_{вх}$ – входное число Рейнольдса;

$v_{вх}, \nu_{вх}$ – скорость и кинематический коэффициент вязкости во входном канале;

$\bar{w}_{\phi m} = w_{\phi m} / v_{\text{вх}}$ – безразмерная максимальная тангенциальная скорость в рабочем объеме;

$\bar{L}_k^p = L_k^p / D_k$ – относительная расчетная длина циклона;

$\bar{l}_{\text{вых}}^n = l_{\text{вых}}^n / D_k$ – относительная длина погружной части выходного канала;

$\bar{\rho}_q = \rho_q / \rho_{\text{вх}}$ – относительная плотность частиц ($\rho_{\text{вх}}$ – плотность газа во входном канале);

K_{O_3} – безразмерный комплекс, характеризующий соотношение сил, вызванных ионизацией, действием электростатического поля, электрического ветра и сил инерции потока,

$$K_{O_3} = \varepsilon_0 \varepsilon_q k_{\text{э.в}} \frac{U_{\text{ц}}^2 + k_{\text{э.в}} U_{\text{и}} U_{\text{ц}}}{D_k^2 \left(\ln \frac{1}{\bar{d}_b} \right)^2} \left(\frac{1}{\rho_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2 / 2} \right); \quad (2)$$

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

ε_q – относительная диэлектрическая проницаемость частиц;

$k_{\text{э.в}}$ – коэффициент, отражающий влияние электрического ветра на эффективность очистки газов в циклоне, $k_{\text{э.в}} \approx 0,2$;

$U_{\text{и}}, U_{\text{ц}}$ – напряжения на ионизаторе и осадительном электроде;

$\bar{d}_b = d_b / D_k$ – безразмерный диаметр вставки-электрода;

$\bar{d}_{\text{чм}} = d_{\text{чм}} / D_k$ – безразмерный средний диаметр частиц;

$\eta_k = R_k / r_{\phi m}$ – безразмерный радиус рабочего объема циклона;

$r_{\phi m}$ – радиус положения $w_{\phi m}$ [4].

На циклонном каплеуловителе с оптимизированными геометрическими и режимными характеристиками выполнены исследования эффективности очистки газов при одновременном действии инерционного и электрического полей. Предварительная ионизация воздушного потока и действие на улавливаемые частицы в рабочем объеме аппарата электрического поля позволили достигнуть увеличения эффективности очистки воздуха.

Оптимальная входная скорость потока в электроциклоне зависит от напряжений на электроде и ионизаторе и вида аэрозолей. Полученные экспериментальные данные позволили рекомендовать для выбора $v_{\text{вх}}^{\text{opt}}$ степенную зависимость вида

$$v_{\text{вх}}^{\text{opt}} = a + bU + cU^2 + dU^3, \quad (3)$$

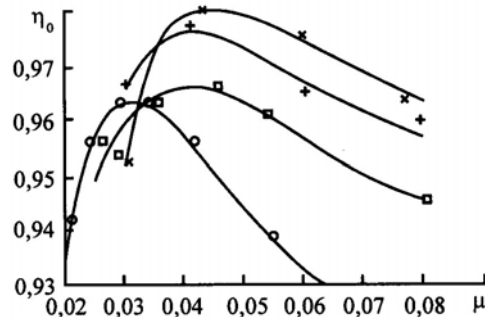
где $a = 16,088$; $b = -0,6827$; $c = 0,151$; $d = -0,00905$ – для воды;

$a = 16,133$; $b = -0,5721$; $c = 0,233$; $d = -0,01776$ – для смазочно-охлаждающей жидкости.

Влияние питающего напряжения на эффективность каплеулавливания можно представить аппроксимирующим уравнением

$$K_U = 1 + aU_{\text{ц}} + bU_{\text{ц}}^2, \quad (4)$$

Рис. 1. Влияние массовой концентрации взвеси μ на полный коэффициент очистки газов от капель влаги η_0 при различных значениях относительной длины цилиндрической части циклона: 1 – $\bar{l}_{\text{ц}} = 0,5$; 2 – 1,0; 3 – 2,0; 4 – 3,0



где $K_U = (\eta_0)_U / (\eta_0)_{U=0}$;

η_0 – полный коэффициент очистки газов;

$a = 0,006415$; $b = -0,000335$ – для воды;

$a = 0,00447$; $b = -0,00016$ – для смазочно-охлаждающей жидкости.

С повышением массового содержания капель жидкости на входе в циклонное сепарационное устройство до определенного значения эффективность очистки газов повышается (рис. 1), достигая максимума при $\mu = \mu_{\text{opt}}$, после чего начинает снижаться. Оптимальное значение μ повышается с ростом относительной длины цилиндрической части циклона $\bar{l}_{\text{ц}} = l_{\text{ц}}/D_{\text{к}}$ и может быть определено по эмпирической формуле

$$\mu_{\text{opt}} = 0,036 \bar{l}_{\text{ц}}. \quad (5)$$

Методика расчета эффективности электроциклонных установок, учитывающая совместное влияние $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{ц}}$, обеспечивает удовлетворительное количественное и качественное соответствие расчетных и опытных значений для различных аэрозолей [2, 5].

Диаметр вставки-электрода является одним из основных геометрических параметров циклонных сепарационных устройств. При правильном выборе диаметра вставки можно повысить аэродинамическое совершенство и эффективность очистки газов в циклоне. Полученные в результате выполненных исследований данные показали, что с увеличением $\bar{d}_{\text{в}}$ коэффициент очистки η_0 растет, достигая максимума при $(\bar{d}_{\text{в}})_{\text{opt}}$, после чего снижается. Оптимальное, с точки зрения аэродинамической и энерготехнологической эффективности, значение $\bar{d}_{\text{в}}$ можно определить по формуле

$$(\bar{d}_{\text{в}})_{\text{opt}} = (\bar{d}_{\text{вых}} - 1,4)(0,212 - 0,84 \bar{f}_{\text{вх}}^{1,1}), \quad (6)$$

где $\bar{d}_{\text{вых}} = d_{\text{вых}} / D_{\text{к}}$ – безразмерный диаметр выходного канала.

В качестве безразмерного комплекса, учитывающего влияние геометрических и режимных параметров на энерготехнологическую эффективность циклонных устройств, в которых основной теплообменной поверхностью является боковая поверхность рабочего объема, может служить безразмерный комплекс

$$K_{\text{эф}} = \frac{\text{Nu}\eta_0}{\text{Re}_{\text{вх}}^n \zeta_{\text{фм}}} = \frac{\text{Nu}\Phi' \left[\frac{\lg(\bar{d}_{\text{чм}} / \bar{d}_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\text{ц}} + \lg^2 \sigma_{\text{п}}}} \right] \bar{w}_{\text{фм}}^2}{\text{Re}_{\text{вх}}^n \zeta_{\text{вх}}}, \quad (7)$$

- где Nu – число Нуссельта;
 n – показатель степени в расчетном уравнении подобия конвективного теплообмена;
 $\zeta_{\text{фм}} = \zeta_{\text{вх}} / \bar{w}_{\text{фм}}^2$ – коэффициент аэродинамической эффективности циклона [3, 4];
 $\zeta_{\text{вх}}$ – суммарный коэффициент сопротивления устройства по входу;
 Φ' – интеграл вероятности;
 $\sigma_{\text{ц}}$ – параметр распределения фракционных коэффициентов очистки;
 $\sigma_{\text{п}}$ – параметр распределения частиц пыли.

Максимальный уровень коэффициента энерготехнологической эффективности достигается при очень больших значениях $\bar{f}_{\text{вх}} = 0,4 \dots 0,5$ и обычных для высокоэффективных циклонных сепараторов значениях $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,38 \dots 0,43$ [4]. Выбор оптимального с энерготехнологической точки зрения безразмерного диаметра выходного канала (при заданной величине $\bar{f}_{\text{вх}}$) соответствует существованию экстремума функции $K_{\text{эф}} = K_{\text{эф}}(\bar{d}_{\text{вых}}, \bar{f}_{\text{вх}})$:

$$\left(\partial K_{\text{эф}} / \partial \bar{d}_{\text{вых}} \right)_{\bar{f}_{\text{вх}}} = 0. \quad (8)$$

Энерготехнологическая эффективность циклона практически не зависит ни от конструкции, ни от диаметра пустотелого коронирующего электрода при $0,268 < \bar{d}_{\text{в}} < 0,821$ [2, 4, 5].

В результате расчетного анализа влияния конструктивных и технологических параметров на удельные затраты по очистке газов, выполненного с применением метода энергоэкологоэкономической оптимизации, получены формулы для определения оптимальных конструктивных и режимных характеристик, обеспечивающих снижение выбросов вредных веществ в атмосферу [2, 4, 5]. Влияние безразмерной длины цилиндрической части циклонного устройства $\bar{l}_{\text{ц}} = l_{\text{ц}} / D_{\text{к}}$ на удельную стоимость очистки газов $C_{\text{о}}$, приведенное на рис. 2, показывает, что оптимальные значения $\bar{l}_{\text{ц}}$ находятся в пределах $2,5 \dots 3,5$. С увеличением $\bar{d}_{\text{вых}}$ от 0,1 до 0,6 удельная стоимость платы за выбросы в атмосферу $C_{\text{в}}$ увеличивается (рис. 3), причем более значительно при $\bar{d}_{\text{вых}} > \bar{d}_{\text{вых}}^{\text{opt}}$. Интенсивность роста $C_{\text{в}}$ повышается с увеличением площади входа $\bar{f}_{\text{вх}}$. В диапазоне $\bar{f}_{\text{вх}} = 0,05 \dots 0,50$ кривые $C_{\text{в}} = C_{\text{в}}(\bar{d}_{\text{вых}})$ пересекаются при $\bar{d}_{\text{вых}} \approx 0,45$.

Относительная экономия средств за счет эффективного теплоиспользования может обеспечить значительное (на 60 ... 90 % и более) снижение стоимости очистки газовых и парогазовых выбросов. Оптимальные

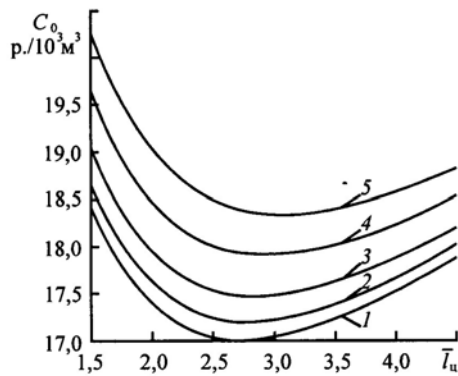


Рис. 2. Зависимость удельной стоимости очистки газов в циклонном сепарационном устройстве C_0 от \bar{T}_c при различной стоимости 1 кВт·ч потребляемой электроэнергии: 1 – $\bar{C}_3 = 0,5$ р./ (кВт·ч); 2 – 0,7; 3 – 1,0; 4 – 1,5; 5 – 2,0 р./ (кВт·ч)

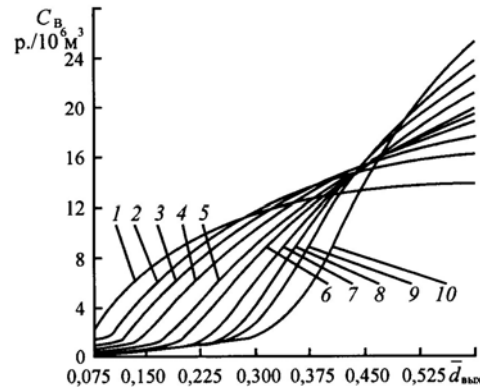


Рис. 3. Влияние $\bar{d}_{\text{вых}}$ на плату за выбросы $1 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ газов из циклона при различных значениях $\bar{f}_{\text{вх}}$: 1 – $\bar{f}_{\text{вх}} = 0,03$; 2 – 0,05; 3 – 0,07; 4 – 0,10; 5 – 0,15; 6 – 0,20; 7 – 0,30; 8 – 0,40; 9 – 0,50; 10 – 0,70

значения \bar{T}_c , $\bar{f}_{\text{вх}}$ и $\bar{d}_{\text{вых}}$, определенные на основе критериев аэродинамической и энерготехнологической эффективности, могут быть скорректированы экологоэкономическими расчетами с учетом изменения тарифов на электрическую и тепловую энергию, стоимостных характеристик металла для изготовления циклонного аппарата, уловленного продукта и других факторов [4].

Использование комбинированных циклонных устройств с оптимальными геометрическими и режимными характеристиками позволяет снизить ущерб от загрязнения окружающей среды на 40 ... 70 % по сравнению со стандартными промышленными аппаратами и может способствовать решению экологических и энергетических проблем северных территорий. Таким образом, на основе экспериментальных и расчетных исследований разработаны рекомендации по снижению потерь электроэнергии в сетях предприятий деревообрабатывающего комплекса, которые приводят к уменьшению затрат электроэнергии на единицу продукции и снижению объемов вредных промышленных выбросов в окружающую среду [3, 4, 6]; выбору оптимальных геометрических параметров циклонных пыле- и каплеуловителей, учитывающих влияние основных конструктивных параметров и технико-экономических показателей на удельную стоимость очистки газа. Для увеличения эффективности очистки воздуха в циклоне предложено использовать предварительную ионизацию потока и создавать электрическое поле в рабочем объеме аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев, С.П. Энергоснабжение предприятий лесоперерабатывающего комплекса [Текст] / С.П. Агеев, В.В. Радюшин, А.В. Ушаков, Г.А. Шепель // Оптимиза-

ция и интенсификация технологических процессов в энергетике и промышленности: сб. науч. тр. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. – С. 11–12.

2. *Карпов, С.В.* Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов [Текст] / С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров; под ред. Э.Н. Сабурова. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. – 504 с.

3. *Карпов, С.В.* Циклонный сепаратор-теплоуловитель / С.В. Карпов, В.В. Радюшин, Э.Н. Сабуров // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. / АГТУ. – 1997. – Вып. 2. – С. 63–71.

4. *Карпов, С.В.* Энерготехнологическая эффективность циклонного сепаратора-теплоутилизатора [Текст] / С.В. Карпов, В.В. Радюшин, Э.Н. Сабуров // Совершенствование техники и технологии лесозаготовок и транспорта леса: сб. науч. тр. ф-та природных ресурсов АГТУ. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. – Вып. 2. – С. 111–118.

5. *Сабуров, Э.Н.* Разработка и исследование высокоэффективных циклонных сепараторов-теплоутилизаторов [Текст] / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов, В.В. Радюшин // Сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. «Экология и жизнь» (Пенза, 30–31 октября 2001 г.). – Пенза, 2001. – Ч. II. – С. 87–90.

6. *Шепель, Г.А.* Пути снижения потерь электроэнергии и выбросов электростанций предприятий лесоперерабатывающего комплекса [Текст] / Г.А. Шепель, И.И. Василишин, В.В. Радюшин // Лесн. журн. – 1997. – № 4. – С. 120–129. – (Изв. высш. учеб. заведений).

7. *Шепель, Г.А.* Рациональное использование электрической энергии [Текст] / Г.А. Шепель, С.П. Агеев, А.А. Шумилов // Проблемы энергетики Европейского Севера: тр. АГТУ. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1996. – С. 48–56.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 18.10.06

S.V. Karpov, V.V. Radyushin, E.N. Saburov, G.A. Shepel
Arkhangelsk State Technical University

Reduction of Electric Power Loss and Hazardous Industrial Emissions at Woodworking Enterprises

Results of investigations are summarized aimed at optimization of electric power supply systems of woodworking enterprises, increasing the treatment efficiency of gaseous industrial emissions from dust and aerosols with the help of cyclone and electro-cyclone separation devices; recommendations are provided regarding the selection of optimal design and mode characteristics ensuring the reduction of pollutant emissions into atmosphere.

Keywords: woodworking industry, quality of electric power supply, reactive power, electric power loss, industrial emissions, cyclone dust and drop catchers, electrocycloning, treatment efficiency, energy efficient optimization.
