

Н. И. БОЙКО, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ПРОМЫШЛЕННОЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА – ОСНОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Розглянуто технології очищення газових викидів, очищення води і інші технології на основі імпульсного коронного розряду. Показано переваги цих технологій порівняно з відомими завдяки використанню сильних імпульсних електричних полів і високо інтенсивних мікрочастинок, насамперед електронів з енергіями приблизно 10 eV і більше.

Technologies of gas exhaust and water cleaning and clearing and other technologies on the base of pulsed corona discharge are considered. Advantages of these technologies are showed in comparison with known ones because of use of high pulsed electric fields and high intensive micro particles in the first place electrons with energies approximately 10 eV and more.

Технологии на основе импульсного коронного разряда

Коронный разряд – вид самостоятельного высоковольтного газового разряда, возникающего в резконеоднородном электрическом поле при превышении напряженностью поля и напряжением на разрядном промежутке начальных значений. Именно коронный разряд используется сегодня в большинстве промышленных высоковольтных электротехнологий. Такими технологиями являются: очистка газовых выбросов от конденсированных частиц в электрофильтрах, озонные технологии на основе коронного разряда в озонаторах, модификация поверхностей различных материалов, в том числе с целью создания многослойных материалов с различными характеристиками слоев, электросепарация с использованием коронного разряда и др.

Цель данной работы – показать эффективные экологические применения импульсного коронного разряда в области ресурсо- и энергосбережения, промышленной экологии.

В последние годы ведутся интенсивные работы по созданию эффективных технологий очистки газовых выбросов от вредных газовых составляющих путем их конверсии в импульсном коронном разряде (ИКР). Кроме того, при помощи ИКР может быть успешно решена проблема конверсии углеводородов в синтез-газ, поскольку в ИКР создается неравновесная плазма с отрывом температуры электронов от температуры атомов и ионов. При этом отпадает необходимость излишнего (до примерно 1200 °C) нагрева газообразных углеводородов, обязательного при традиционной тепловой технологии конверсии углеводородов в синтез-газ. Поскольку газообразные углеводороды, в том числе метан (CH₄), являются возобновляемыми источниками энергии, постольку энергоэффективная (с большим выходом H₂ + CO или с более низкими рабочими температурами) технология конверсии их в синтез-газ и другие газы, обогащенные водородом, при помощи ИКР представляется весьма актуальной и перспективной.

Остановимся подробнее на различиях в использовании ИКР в электро-

фильтрах, где удаляются конденсированные (твердые и жидкие) частицы, и в плазменных реакторах с ИКР, где происходит конверсия газов.

ИКР в электрофильтрах применяется сравнительно недавно и позволяет увеличить рабочие напряжения и напряженности в электрофильтрах (по сравнению с постоянным напряжением), уменьшить вероятность недопустимого обратного коронного разряда [1]. Основным действующим фактором в электрофильтрах является напряженность E электрического поля. Результатом, характеризующим работу электрофильтра, является степень очистки η газа в нем от конденсированных частиц (например, частиц пыли):

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{v\chi l}{uH}\right), \quad (1)$$

где v – скорость дрейфа частиц под действием электрического поля у поверхности осадительного (то есть некоронирующего) электрода; $\chi = z_{0C}/z_x$, z_{0C} – концентрация частиц (пыли или других твердых или жидких частиц) у осадительного электрода; z_x – средняя по сечению электрофильтра концентрация частиц; l – длина электрофильтра; u – скорость газа в электрофильтре; H – расстояние между осадительными электродами.

$$v = \frac{qE}{6\pi\mu a}, \quad (2)$$

где q – заряд частицы; μ – коэффициент динамической вязкости среды (для воздуха $\mu = 1,85 \times 10^{-5}$ кг/(м×с)); a – характерный размер частицы.

Для $a > 1$ мкм $q \sim a^2 E$. Тогда из (2) следует)

$$v = \frac{qE}{6\pi\mu a} \sim \frac{aEE}{6\pi\mu} \sim aE^2. \quad (3)$$

Из (1) и (3) следует, что в электрофильтре по его длине сначала осаждаются крупные частицы, а затем – все более мелкие, поскольку скорость дрейфа частиц к осадительному электроду пропорциональна их характерному размеру.

В реакторах с ИКР для конверсии газовых потоков первичным фактором также, как и в электрофильтрах, является сильное импульсное электрическое поле, его напряженность, однако основными действующими факторами являются активные микрочастицы: электроны, фотоны, ионы, радикалы и др. Напряженность поля в плазменных реакторах превышает таковую в электрофильтрах, поскольку в эти реакторы подается очищенный от конденсированных примесей, а значит электрически более прочный газ, подлежащий конверсии. Электроны в сильном электрическом поле ИКР-реактора набирают энергию ~ 10 эВ и более, достаточную для возбуждения, диссоциации и ионизации атомов и молекул конвертируемого газа или газовой смеси. В результате образуются ионы, радикалы, возбужденные атомы и молекулы, имеет место широкополосное излучение, протекают плазмохимические реакции, приводящие к конверсии исходного газа или газовой смеси.

Эффективность ИКР-плазмохимического реактора отображает G-фактор – число наработанных активных микрочастиц, приходящихся на единицу

энергии, вложенной в разряд [1, с. 163]:

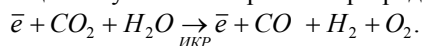
$$G_j(t) = \frac{N_j(t)}{\int_0^t U(t') \times i(t') dt'}, \quad (4)$$

где N_j – полное число частиц сорта j в объеме разряда, наработанное к моменту времени t ; $u(t')$ и $i(t')$ – зависящие от времени напряжение и ток разряда.

Экологическое использование импульсного коронного разряда

Импульсный коронный разряд может быть широко использован для очистки газовых выбросов, выхлопов двигателей внутреннего сгорания, очистки и обеззараживания воды, в том числе сточной. Широко известен эффект удаления NO_x и SO_2 в газовых выбросах при помощи коронного разряда [2]. Одним из факторов, препятствующих широкому внедрению технологий очистки с использованием коронного разряда, является величина удельных энергозатрат. Эта величина может быть существенно уменьшена при использовании импульсного коронного разряда (ИКР). Дальнейшего уменьшения удельных энергозатрат можно добиться, используя рациональные плазмокаталитические технологии на основе ИКР. В [1] отмечается, что созданы пилотные газоразрядные установки по очистке газовых выбросов теплоэлектростанций от оксидов азота и серы. Ведутся работы по использованию импульсных газовых разрядов для очистки газовых выбросов лакокрасочных, гальванических и пропиточных производств от паров растворителей и компаундов в замен энергоемких технологий высокотемпературного дожига.

Экспериментально была продемонстрирована возможность конверсии CO_2 в CO в увлажненной газовой смеси воздуха с CO_2 при комнатной температуре смеси при помощи импульсного коронного разряда [3]:



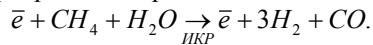
Технологическая реализация такого плазмохимического процесса в сильном импульсном электрическом поле с достаточной плотностью энергии поможет решить проблему утилизации CO_2 с получением на выходе ценного сырья для современной энергетики – синтез-газа ($\text{H}_2 + \text{CO}$ в необходимой пропорции).

В статье [4] показано, что ИКР может успешно использоваться для решения таких экологических проблем как очистка и микробиологическое обеззараживание воды и газовых выбросов.

Важным преимуществом ИКР является наличие высокоэнергетических электронов с энергией ≈ 10 эВ и более. Эта энергия гораздо больше энергии тяжелых микрочастиц – атомов, ионов молекул, поскольку электроны в сильном импульсном электрическом поле набирают энергию гораздо быстрее ионов, а не имеющие результирующего заряда атомы и молекулы электрическим полем не ускоряются вообще. Поэтому на фоне комнатной температуры (≈ 300 К) у тяжелых микрочастиц, а значит и вещества в целом, температура электронов может достигать величин $T_e \approx W_e/k = 10 \text{ эВ}/(1,38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}) \approx$

$\approx 1,16 \times 10^5$ К.

Это преимущество ИКР может быть с успехом использовано при решении экологической проблемы газовых выбросов, в том числе при конверсии попутных газов, содержащих значительное количество метана. При помощи энергетически эффективных технологий на основе ИКР без использования неоправданно высоких температур метан (и другие углеводороды) в попутном газе может быть конвертирован в парах воды в синтез-газ:



Выводы

1. Коронный разряд – вид электрических разрядов, который в настоящее время наиболее широко применяется в высоковольтных электротехнологиях, имея при этом большой потенциал для использования в новых технологиях.
2. Импульсный коронный разряд (ИКР) позволяет создать неравновесную газоразрядную плазму с температурой электронов более 10 эВ в энергетических единицах (более 100000 К) без существенного нагрева самой плазмы и может использоваться в промышленных масштабах.
3. Одним из перспективных промышленных применений ИКР является конверсия в нем газообразных углеводородов, в том числе метана (CH_4), в синтез-газ ($H_2 + CO$) при существенно более низких удельных энергозатратах, чем в известных тепловых технологиях такой конверсии.
4. Экологическое использование ИКР включает очистку с его помощью газовых выбросов от конденсированных частиц (в электрофильтрах), конверсию газов (в том числе утилизацию CO_2) в газовых выбросах (в плазмохимических реакторах с ИКР), очистку и обеззараживание воды и др.

Список литературы: 1. Высоковольтные электротехнологии: учеб. пособ. / Аношин О.А., Белогловский А.А., Верещагин И.П. и др.; под ред. И.П. Верещагина. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 204 с. 2. Применение наносекундного коронного разряда для очистки дымовых газов от оксидов азота / Амиров Р.Х., Асиновский Э.И., Самойлов И.С., Шепелин А.В. // Энергетическое строительство. – 2003. – № 9. – С. 9-15. 3. Конверсия газовых выбросов при помощи импульсного коронного разряда с частотой следования импульсов более 10000 импульсов в секунду / Бойко Н.И., Борцов А.В., Ездошенко Л.С. и др. // Озон и другие экологически чистые окислители: Наука и технологии: 31-й Всероссийский семинар, 2 – 3 июня 2010 г.: сборник материалов / под ред. В.В. Лунина, В.Г. Самойловича, С.Н. Ткаченко. – М.: МАКС Пресс, 2010. – 292 с. – С. 121-126. 4. Бойко Н.И. Высоковольтные импульсные электротехнологии очистки и обеззараживания воды и газовых выбросов / Н.И. Бойко // Вода и экология: Проблемы и решения. – 2008. – № 1. – С. 60-72.

Поступила в редколлегию 08.04.2011