

Химия и химические технологии

УДК 537.5:544.51

*А.В. БОРИСЕНКО, Г.А. МУСТАФИНА,
С.Д. ФАЗЫЛОВ, З.М. МУЛДАХМЕТОВ, М.Ж. ЖУРИНОВ*

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РЕАКЦИОННОЙ ЗОНЕ ГАЗООЧИСТНОЙ УСТАНОВКИ СИСТЕМЫ БОРИСЕНКО А.В.

Институт органического синтеза и углехимии РК, г. Караганда

В работе рассмотрены теоретические основы химических превращений оксидов углерода, азота, серы в поле высокого напряжения в условиях неравновесности системы. Модель химических процессов рассмотрена с учетом физико-химической газодинамики в межэлектродной области аэроионной установки системы Борисенко А.В. (серия В).

В последние годы успешно развиваются научные направления, связанные с использованием низкотемпературной плазмы для решения технологических и природоохранных задач [1-4].

В течение ряда лет компания «ABsalut Ecology» занимается разработкой новой аэроионной газоочистной установки, позволяющей с высокой эффективностью осуществлять очистку промышленных газовых выбросов от токсичных примесей CO, CO₂, NO_x, SO₂, H₂S и др. [5,6]. Сложность процессов, протекающих в реакционной зоне установки, не позволяет остановиться только на общепризнанных теориях в объяснении явлений в данной области. Поэтому в настоящее время целью наших исследований является накопление экспериментальных данных в широком диапазоне изменения параметров разряда и развитие различных моделей основных процессов, ответственных за существование реакционной зоны в аэроионной установке серии В.

Целью настоящей работы является анализ физико-химических процессов, приводящих к химическим превращениям оксидов углерода, азота, серы в поле высокого напряжения в условиях неравновесности системы и с учетом физико-химической газодинамики в межэлектродной области аэроионной установки серии В.

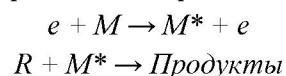
Химические реакции в аэроионной установке серии В

В работе аэроионной установки серии В заложен принцип действия классического, электроэффлювиального ионизатора Чижевского. При электроэффлювиальном способе ионизация газа происходит под действием электрического поля высокой напряженности, которое появляется в системе двух электродов, имеющих разные размеры. Электроны, покинувшие металл острия, образуют лавину электронов, летящих от острия к положительному электроду. Положительные ионы кислорода притягиваются к отрицательному электроду – игле, сталкиваясь с металлом острия, выбивают дополнительные электроны. В системе возникают два противоположных лавинообразных процесса, которые, взаимодействуя друг на друга, образуют *тепловой (тихий) разряд в газе* [7].

В межэлектродном пространстве газоразрядной установки серии В при потенциале игольчатого катода порядка 20-40 кВ создается электрическое поле высокой напряженности. Активная реакционная зона установки характеризуется как *униполярная, низкотемпературная неравновесная газоразрядная система* [5,6,8].

Уникальные физико-химические свойства слабоионизированной низкотемпературной плазмы обусловлены кинетическими характеристиками электронов, средняя энергия которых значительно превышает энергию тяжелых частиц (молекул, атомов и ионов).

Электроны, образующиеся во всех электрических разрядах при ионизации части атомов и молекул газа, обеспечивают передачу энергии от электрического поля тяжелым частицам газа [9-11]:



где e – электрон, M^* – атом или молекула в электронно-возбужденном состоянии, R – молекула-реагент.

Константы скоростей этих процессов зависят как от величины напряженности электрического поля, так и от химического состава газовой смеси. Условия разряда определяют типы активных частиц и их относительные количества [9-11].

В аэроионной установке серии В молекулы CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , H_2O при соударении с электронами приходят в возбужденное состояние. При многократном прохождении через активную зону молекула получает энергию, достаточную для реакции диссоциации (энергия электрического поля, преобразованная в энергию фотонного излучения, тепловой энергии экзотермической реакции). Далее осуществляется реакция распада с получением элементарных продуктов [5,6,8].

Квантово-химическое объяснение данного процесса основано на том, что при столкновениях молекула совершает одноквантовые переходы между дискретными колебательными уровнями энергии (рисунок 1) вплоть до некоторого уровня m , с которого осуществляется переход в непрерывный спектр колебательных энергий. За счет столкновительных процессов избыточная заселенность распространяется на еще более высокие колебательные уровни, включая уровень m . Превышение заселенности m -го уровня над равновесной увеличивает скорость диссоциации.

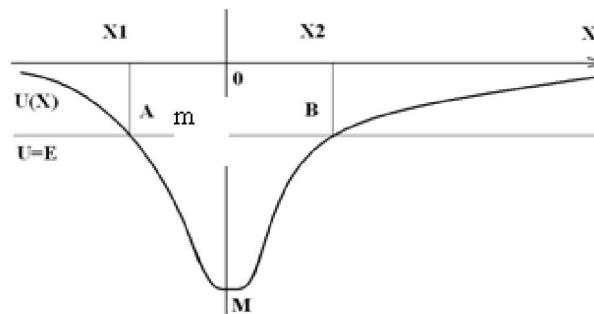


Рис. 1. Схема потенциальной ямы – ограниченная область пространства с пониженной потенциальной энергией частицы

Источником достаточной для генерации колебательно-возбужденных частиц со скоростями, большими, чем скорость колебательной релаксации, является мощный лазер инфракрасного диапазона (например, CO_2 -лазеров) или любые фотонные излучатели [13,14].

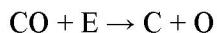
Для селективного воздействия на химические реакции используются любые методы, осуществляющие «разогрев» тех степеней свободы, которые непосредственно участвуют в реакции. Физический механизм этого воздействия такой же, как и при лазерной накачке [14,15].

Возвращаясь к процессам, протекающим в газоразрядной зоне аэроионной установки серии В, можно констатировать, что диссоциация молекул проходит по вышеописанному механизму. При достаточно длительном воздействии электронного, фотонного излучения на молекулу газа, на верхних электронных уровнях создается избыточная заселенность, которая приводит к диссоциации [16].

Авторами работы [17,18] исследовано формирование низкотемпературной плазмы импульсным электронным пучком и было обнаружено значительное снижение энергозатрат на конверсию газофазных соединений. Анализ экспериментальных работ, посвященных разложению примесей различных соединений (NO_x , SO_2 , CO , CS_2 и др.) в воздухе импульсным электронным пучком показал, что его энергозатраты на разложение одной молекулы газа ниже даже ее энергии диссоциации. Авторы обусловливают это тем, что при воздействии электронного пучка формируются условия для протекания цепных процессов.

При достаточной цепи данных реакций электрофизическая установка обеспечивает незначительную часть полных затрат энергии на химический процесс. Основной источник в этом случае – тепловая энергия исходного газа или энергия экзотермических реакций цепного процесса (например, реакции окисления или полимеризации). Снижение температуры при цепном химическом процессе аналогично каталитическому эффекту. Цепной процесс может протекать во всем объеме газа, что значительно увеличивает скорость реакции по сравнению с гетерофазным каталитическим процессом [18].

Диссоциативный механизм очистки дымовых газов от токсичных компонентов описан в работе [19]. Нейтрализация вредных примесей в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания обеспечивается диссоциацией двуокиси азота, угарного газа и углеводородов в системе выброса отработавших газов двигателя до соединений, безвредных для человека и экологии. Диссоциация осуществляется электронным ударом молекул двуокиси азота (NO_2), угарного газа (CO) и углеводородов (H_nC_m) переводом их возбужденного состояния на уровень нестабильного возбужденного состояния (7-15 эВ) в соответствии с нижеприведенными формулами:

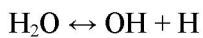
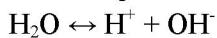


где E – энергия электронного удара.

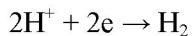
Сначала дымовые газы обрабатывают потоком альфа-частиц, вызывающих ударную ионизацию молекул воздуха с образованием положительных ионов, свободных электронов. Далее газ проходит через сетку, где поддерживается отрицательный электрический потенциал при помощи источника постоянного тока. Положительные ионы восстанавливаются на электроде. Свободные электроны, проходя через сетчатый электрод, получают облако электронов с энергией в диапазоне 7-15 эВ, которая вызывает возбужденное состояние молекул вредных примесей и их диссоциацию в отработавших газах двигателя [19].

В аэроионной установке серии В лавинообразное движение заряженных частиц создает условия образования различных активных частиц и протекания цепных окислительно-восстановительных реакций. Очищаемый газ состава CO_2 , CO , N_2 , O_2 , NO_x , SO_2 , H_2O , твердые частицы многократно прокачиваются через активную зону установки за счет вихревого движения газового потока вдоль поверхности игольчатого инжектора [5-6,8].

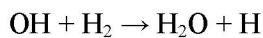
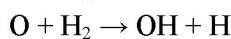
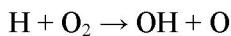
Унипольлярность активной среды установки В способствует диссоциации молекулы воды:



Ион водорода отбрасывается к катоду и нейтрализуется. Эта реакция является началом разветвленной цепной реакции в реакционной зоне установки:

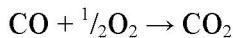


Далее протекает реакция водорода с кислородом, где на одну исчезнувшую активную частицу образуется три новых:



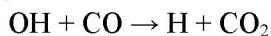
В результате число активных центров стремительно нарастает (разветвленно-цепной механизм), и если скорость обрыва цепей недостаточно велика, реакция может перейти во взрывной. Реакция сопровождается колossalным выделением тепловой энергии (2800-3000°C). Обрыв цепи может быть осуществлен за счет потребления выделяемой энергии в эндотермических реакциях.

В присутствии ионизированного кислорода O_2^- , являющегося сильным окислителем, протекает реакция:

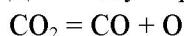


Температура в момент окисления достигает 3334°C.

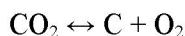
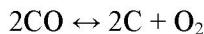
Далее инициируется процесс восстановления молекулярного водорода в условиях темнового разряда:



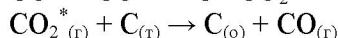
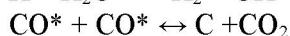
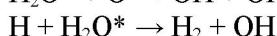
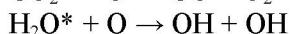
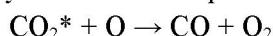
Диоксид углерода при 1300° распадается на окись углерода и кислород:



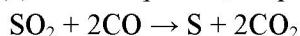
В реакционной зоне установки создаются условия термической диссоциации. Реакции диссоциации возбужденных молекул оксидов углерода $\text{CO}_2(\text{IV})$, $\text{CO}(\text{II})$ в этих условиях являются превалирующими и протекают с поглощением энергии вышеописанных реакций (начинается реакция при 1700°C, интенсивно – при 2500°C):



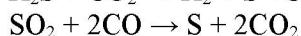
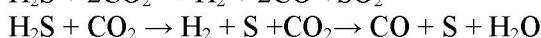
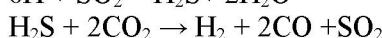
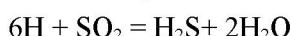
Возбужденные молекулы O_2^* , H_2O^* , CO^* , CO_2^* при соударении с нейтральными молекулами излучают квант энергии или взаимодействуют:



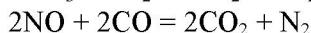
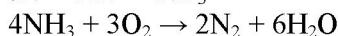
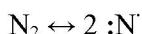
Диоксид серы SO_2 в присутствии CO восстанавливается до элементарной серы:



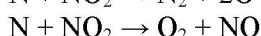
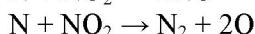
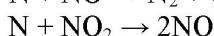
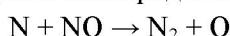
Механизм реакции восстановления SO_2 в присутствии водорода возможно по следующей схеме:



Оксиды азота NO_x и азота N_2 в активной зоне



Авторами работы [20] представлены результаты экспериментальных исследований разложения оксидов азота NO_x в дымовых газах, ионизируемых пучком электронов микросекундной длительности. Показано, что основным механизмом разложения оксидов является их диссоциация при взаимодействии с атомарным азотом. При этом в качестве конечного продукта образуются молекулярный кислород и азот.



Таким образом, источником для генерации колебательно-возбужденных частиц со скоростями, большими, чем скорость колебательной релаксации в аэроионной установке являются электроны, фотоны, испускаемые возбужденными атомами в газоразрядной области, тепловое излучение экзотермических реакций. Конечными продуктами химических реакций установки являются элементарные вещества, образованные диссоциацией исходных оксидов по разветвленно-цепному механизму и активированные электрическим полем высокого напряжения. Такой механизм удаления токсичных примесей может быть использован при создании безотходной электрофизической технологии очистки дымовых газов.

Физико-химическая газодинамика в газоразрядной зоне

Для приближения модели газоразрядных процессов в аэроионной установке серии В к реальным процессам, необходимо дополнить данную модель параметрами газодинамики. Исследование влияния газодинамических факторов на параметры и область существования газовых разрядов освещены в многочисленных работах [1, 21-28].

К настоящему времени закономерности электрического разряда в потоке газа изучены недостаточно полно как теоретически, так и практически, так как в такой системе происходят многочисленные элементарные *физико-химические процессы*. До сих пор малоизученным остается взаимное влияние газодинамических параметров потока и электрических характеристик разряда. Изучение этой взаимосвязи открывает новые перспективы использования потока для обеспечения однородности распределения основных электрических характеристик в зоне разряда, выравнивания электрических характеристик и повышения устойчивости разряда.

Авторы работы [1] исследовали тлеющий разряд в потоке (ТРП). В работе показано, что ТРП, так же как и тлеющий разряд в трубке, характеризуется высокой степенью неравновесности плазмы и достаточным большим значением «приведенной» напряженности электрического поля (E/N) в области положительного столба, что в случае молекулярного газа обеспечивает *высокую эффективность преобразования электрической энергии в энергию колебательных уровней молекул*. В отличие от разряда, охлаждаемого и стабилизируемого стенками трубы, охлаждение и стабилизация ТРП осуществляется за счет конвективного выноса газа из зоны, занимаемой разрядом, что позволяет осуществлять стационарный неконтрагированный разряд большей мощности при повышенных давлениях. Именно эти особенности ТРП определяют его практическое применение в технике мощных быстропроточных лазеров, в плазмохимических реакторах и т.п. Рассмотрен механизм разряда в потоке газа. Под механизмом разряда авторы подразумевают связь элементарных процессов, определяющих баланс числа заряженных частиц с макроскопическими свойствами разряда – вольтамперной характеристикой (ВАХ), а также пространственным распределением плотности тока j и электрического поля E в разряде. Эта связь самосогласована, поскольку константы скоростей многих элементарных процессов резко зависят от напряженности электрического поля, и, кроме того, скорости отдельных процессов могут нелинейным образом зависеть от плотности тока.

Исследования показали *влияние параметров потока* на величину предельного энерговклада в разряд. При увеличении скорости потока V (м/с) величина W^* – предельного энерговклада в разряд (Дж^{-1}) проходит через максимум ($V_{\max} \approx 30\text{-}300$ м/с), положение и величина которого определяются, в частности, геометрией разрядной камеры. Сильное влияние на предельные характеристики разряда оказывает профиль скорости потока. При увеличении степени турбулентности E сначала наблюдается уменьшение $(jE)^*$ – предельной объемной мощности тлеющего разряда в потоке газа (Вт см^{-3}), а, начиная с некоторого значения E , наблюдается рост и последующее насыщение $(jE)^*$ [1].

Исследованию катодной газодинамики в тлеющем разряде посвящены работы [24,25]. Авторы данных работ рассматривали вопросы оценки энерговклада в катодном слое для среды лазера при $p = 0,5\text{-}8$ bar, плотности тока $j = 50, 300 \text{ A/cm}^2$. Предпринята попытка анализа термоионизационной неустойчивости катодного слоя, исследованы расширяющиеся поперек поля катодные слои с использованием системы уравнений вязкого теплопроводного умеренного разряженного газа.

В работах [23] проведен анализ видеокадров короны (отрицательное напряжение), который показал, что чехол короны в диапазоне напряжения 5-13 кВ имеет шарообразную форму, размеры короны монотонно увеличиваются с ростом напряжения. При более высоких напряжениях форма коронного разряда изменяется и приобретает специфические очертания. Отмечено, что данный факт связан несовпадением зон ионизации и рекомбинации, которое объясняется исключительно гидродинамическим движением среды как целого.

Авторами работ [2,7,12, 29,30] рассмотрена газодинамика в коронном разряде. В данном случае на процессы в газоразрядной зоне оказывает большое влияние электрический ветер (ионный ветер), который возникает в поле коронного разряда. Электрический ветер приводит к нарушению ламинарного потока в газоочистных установках [2] и представляет собой коллективное движение газа в разрядном промежутке, возникающее в результате столкновений заряженных молекул, движущихся по направлению силовых линий поля с нейтральной компонентой газовой среды.

Авторами [29] проведены отдельные эксперименты, которые показали, что появление короны сопровождается появлением электрического ветра достаточно высокой скорости: до нескольких метров в секунду. Возникающий электрический ветер выносит ионизированный газ в межэлектродный промежуток и при этом у противоэлектрода наблюдается расширение светящейся области, сопровождающееся увеличением яркости свечения. В результате исследований выявлены и описаны некоторые особенности коронного разряда в воздухе при атмосферном давлении и показаны их взаимосвязь с электрическим ветром. Наличие электрического ветра в разрядном промежутке может существенным образом изменить общую картину теплопередачи в разрядном промежутке за счет увеличения коэффициента теплоотдачи плазмообразующего газа стенке установки [2].

Важной частью газодинамических течений являются вихревые структуры. Ими определяются такие характеристики течения, как положение точки отрыва потока, эффективность перемешивания внутри лазеров или камер сгорания, наличие зон возвратного течения и стабилизация пламени в вихревых горелках. Работа [31] посвящена анализу взаимодействия одиночных вихрей и вихревых течений на энерговыделения, вызванного неравновесным состоянием среды. Примером такой среды может служить среда газового разряда.

Межэлектродное пространство аэроионной установки серии *B* характеризуется сложной газодинамикой. Газ тангенциально подается в межэлектродное пространство с определенной скоростью ($V=10$ м/с). В результате газ вращается внутри установки вокруг игольчатого инжектора. Очищаемый газ при многократном прохождении по спирали поверхности игольчатого инжектора подвергается длительному воздействию фотонного, теплового излучений, что создает избыточную заселенность верхних электронных уровней. Под действием центробежной силы, возникающей при вращательном движении газа, переноса зарядов в электрическом поле твердые частицы отбрасываются от центра к периферии, осаждаются на аноде [8].

Турбулентное движение ионного ветра обусловлено движением заряженных частиц в униполярном электрическом поле. Образуются микровихри возле острий игл, которые далее определяют образование вихрей в основном газовом потоке. Продольная прокачка газа через такую газоразрядную зону определяет вихревой характер газового потока.

В настоящее время нами не исследовано влияние энергии вихревых потоков в электромагнитном поле катодной области и геомагнитном поле Земли на физико-химические процессы в реакционной зоне установки, хотя данный фактор является одним из основных параметров, регулирующих возможность протекания химических реакций. Вопросы такого характера рассматриваются спиновой химией, основным объектом которой является *угловой момент реагентов*. Фундаментальный закон об угловом запрете означает, что химические реакции разрешены только для таких угловых состояний реагентов, угловой момент которых совпадает с угловым состоянием продукта. Запреты химическим реакциям по угловому моменту значительно превосходят строгость энергетических запретов.

Под действием магнитного поля на химические системы понимается, что действие магнитного поля связано лишь с влиянием на магнитную подсистему – на энергию магнитных частиц вещества (молекулы, свободные радикалы, обладающие моментом количества движения – спином). Образование химической связи возможно, если сталкивающиеся радикалы находятся в синглетном состоянии. Такая реакция протекает быстро, эффективно и безактивационно, т.е. энергия активации реакции близка к нулю. Таким образом, управляя спиновыми состояниями реагирующих частиц, можно изменять временной масштаб реакции – управлять скоростью химического взаимодействия [32,33].

Заключение

Многочисленные исследования ведущих научных центров РАН физико-химических процессов электрического разряда в потоке газа, а также результаты исследований реакционной зоны газоразрядной установки серии *B*, показывают сложную взаимосвязь между параметрами электрического разряда и газового потока на физико-химические процессы в межэлектродном пространстве.

В реакционной зоне установки серии *B* имеется зона каталитической активации молекул. Электрическое поле высокой напряженности является источником факторов возбуждения колебательных и вращательных уровней, ответственных за процесс диссоциации. Газодинамика в установке серии *B*:

- «электронный ветер»;
- вихревые структуры в газовом потоке;
- тангенциальное движение газового потока

также определяют особенности условий протекания восстановительных процессов и критических условий работы установки серии *B*.

Исследования спинового состояния реагирующих веществ в реакционной зоне установки позволит в будущем рассмотреть вопрос эффективного и безактивационного управления скоростью химического взаимодействия.

Таким образом, электрическое поле высокой напряженности, неравновесность реакционной системы, физико-химическая газодинамика обуславливают и объясняют образование элементарных веществ (сажи, серы, кислорода и т.д.) в реакционной зоне аэроионной установке серии *B*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Велихов Е.П., Голубев В.С., Пашкин С.В. Тлеющий разряд в потоке газа //Успехи физ. Наук. 1982. Т.137. Вып.1. С.117-150.

2. Чекалов Л.В. Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения: автор. на соискание ученой степени доктора технических наук. Семибратово, 2007. 20 с.
3. Токарев А.В. Коронный разряд и его применение. Бишкек: КРСУ, 2009. 138 с.
4. Верещагин И.П., Ткаченко В.М., Чекалов Л.В. К обоснованию применения дымовых электрофильтров с увеличенным межэлектродным расстоянием //Электричество, 2009. – № 2. С. 53-102.
5. Борисенко А.В., Гришин А.В., Газалиев А.М., Мулдахметов З.М., Журинов М.Ж. Активные факторы темного электрического разряда между игольчатым катодом и жидким анодом в системе твердый электрод-газ-жидкость //Доклады НАН РК. 2006. №.3 С.69-74.
6. Борисенко А.В. Универсальная установка по очистке промышленных дымовых газов в электрическом поле высокой напряженности //Материалы докл. Межд. научно-практ. конф. «Химия –XXI век: Новые технологии, новые продукты». Кемерово, 2006. С. 309-312.
7. Чижевский А.Л. Аэроионы и жизнь. Беседы с Циolkовским. М.: Мысль, 1991. 137с.
8. Борисенко А.В. Научные основы и практические аспекты электрохимических процессов в газовой фазе в зоне темнового электрического разряда между игольчатым катодом и «жидким» анодом: автор. на соискание ученой степени доктора химических наук. Караганда: 2007. 26 с.
9. Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980. 310 с.
10. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984. 414 с.
11. Зайцев Ю.В., Соловьев А.В., Носачёв К.В. Механизм образования различных видов ионов в электроэффлювиальном ионизаторе //Электронный научный журнал «Исследовано в России». 2006, 111 С.1056-1064. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/111.pdf>.
12. Мордовский госуниверситет им. Н.П.Огарёва, факультет электронной техники и НПП "Альфаприбор". Прибор «АЭРОИОН-25».
13. Гурвич Л.В. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М.: Наука, 1974. 351 с.
14. Осипов А.И., Уваров А.В. Кинетические и газодинамические процессы в неравновесной молекулярной физике // Успехи физ. наук. 1992. Т.162. №11. С.3-41.
15. Неравновесная колебательная кинетика. Пер. с англ. /Под ред. М. Капителли. М.: Мир, 1989. 392с.
16. Бочарова А.В. Борисенко А.В. Кvantovo-химический подход к проблеме газовых реакций в электрических разрядах // Вестник КарГУ. Серия хим. 2005. №4(40). С.15-21.
17. Власов В.А., Пушкирев А.И., Ремнев Г.Е., Сазонов Р.В., Сосновский С.А. Неравновесные плазмохимические процессы – основа будущих плазменных технологий //Известия Томского политехнического университета. Сер. Математика и механика. Физика, 2007. Т.311. №2. С.75-79
18. Пушкирев А.И., Новоселов Ю.Н., Ремнев Г.Е. Цепные процессы в низкотемпературной плазме. Новосибирск: Наука, 2006. 226с.
19. Патент РФ RU2323355. Международная заявка (РСТ) WO 2008/140349. Ладыченко Э.Л. и др. Способ нейтрализации вредных примесей в отработавших газах двигателя внутреннего сгорания и устройство для его осуществления. 15.05.2007. Опубл.27.04.2008 Бюл. №12..
20. Денисов Г.В., Новоселов Ю.Н., Ткаченко Р.М. Диссоциация оксидов азота под действием импульсного пучка электронов //Письма в ЖТФ. 2000. Т.26. Вып. 16. С.30-34.
21. Компаниец В.З., Овсянников А.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Химические реакции в турбулентных потоках газа и плазмы. М.: Наука, 1978. 218 с.
22. Акишев Ю.С., Пашкин С.В., Соколов Н.А. Динамика контрагирования стационарного тлеющего разряда в потоке воздуха Физика плазмы. 1978. Т. 4. Вып. 4. С. 858-863.
23. Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Петрушенко И.Н., Стишков Ю.К. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе //Журнал теоретической физики. – 2008. Т.78. Вып.7. С.30-34.
24. Баранов Г.А., Смирнов С.А. О влиянии газодинамической структуры потока на параметры самостоятельного разряда //Журнал технической физики. 1999. Т.69. №11. С. 42-48.
25. Смирнов С.А., Баранов Г.А. Газодинамика и термоионизация неустойчивость катодной области тлеющего разряда. I //Журнал технической физики. 2001. Т.71. Вып.7. С. 30-38.
26. Дандарон Г.-Н.Б., Балданов Б.Б. Экспериментальное исследование влияния газа на импульсы тока отрицательной короны в токе аргона //Прикладная физика. 2007. №1. С.84-86.
27. Мухамадияров Х.Г. Обобщенные тепловые и энергетические характеристики тлеющего разряда в потоке воздуха: автореф. канд. тех. наук: 01.02.05. Казань, 2006. 10 с.
28. Яшиев М.Ю. Исследование взаимодействия мощного лазерного излучения с потоками газа и плазмы и управление его характеристиками:– механика жидкости, газа и плазмы: автореф. на соискание ученой степени ученой степени доктора физ.-мат. наук: 01.02.05. М.: 2009. 20с.
29. Винайкин М.Ю., Зуев Д.В., Стишков Ю.К. Взаимосвязь кинематики электрического ветра с формой чехла коронного разряда // IX Межд. научная конф. «Electrohydrodynamics of Liquids (MPEEL)». Санкт-Петербург, 2009. С.37-44.
30. Кулешов П.С. Экспериментальное изучение взаимодействия коронного разряда и испарения воды //Электронный научный журнал «Исследовано в России» – <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005.227.pdf> – С.2330-2343
31. Винichenko Н.А. Влияние энерговыделения на структуру вихревых течений в неравновесном газе: автор. на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Специальности 01.04.17 – Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва. М.: 2009. 10с.

32. Каплан Л.Г., Откidyчев П.А. Механизм возникновения магнитного поля при вихревых процессах в звездных плазмах //Космические исследования. 2009. Т.47, №3. С.238-246.

33. Дроздов А.В. Спиновые подсистемы – новый масштаб рассмотрения действия факторов низкой интенсивности //Материалы VIII International Crimean Conference «Cosmos & Biosphere». Sudak, Украина, 2009.

REFERENCES

1. Velihov E.P., Golubev V.S., Pashkin S.V. *Uspehi fizicheskikh nauk*. **1982**, 137, 1, 117-150 (in Russ.).
2. Chekalov L. V. *Semibratovo*, **2007**, 20 p. (in Russ.).
3. Tokarev A.V. *Bishkek, KRSU*, **2009**, 138 p. (in Russ.).
4. Verewagin I.P., Tkachenko B.M., Chekalov L.V. *Jelektrichestvo*, **2009**, 2, 53-102 (in Russ.).
5. Borisenko A.V., Grishin A.V., Gazaliev A.M., Muldaumetov Z.M., Zhurinov M.Zh. *Doklady NAN RK*, **2006**, 3, 69-74 (in Russ.).
6. Borisenko A.V. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Himija – XXI vek: Novye tehnologii, novye produkty»*. Kemerovo, **2006**, 309-312 (in Russ.).
7. Chizhevskij A.L. *Besedy s Ciolkovskim. Mysl'*, **1991**, 137 p. (in Russ.).
8. Borisenko A.V. *Avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni doktora himicheskikh nauk*. Karaganda, **2007**, 26 p. (in Russ.).
9. Sloveckij D.I. *Mehanizmy himicheskikh reakcij v neravnovesnoj plazme*. Nauka, **1980**, 310 p. (in Russ.).
10. Rusanov V.D., Fridman A.A. *Fizika himicheski aktivnoj plazmy*. Nauka, **1984**, 414 p. (in Russ.).
11. Zajcev Ju.V., Solov'jov A.V., Nosachjov K.V. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/111.pdf>. 1056-1064.
12. Mordovskij gosuniversitet imeni N.P.Ogarjova, *Pribor AEROION-25*. (in Russ.).
13. Gurvich L.V. *Jenergij razryva himicheskikh svyazej. Potencialy ionizacii i srodstvo k elektronu*. Nauka, **1974**, 351 p. (in Russ.).
14. Osipov A.I., Uvarov A.V. *Uspehi fizicheskikh nauk*. **1992**, 162, 11, 3-41 (in Russ.).
15. *Neravnovesnaja kolebatelnaja kinetika*. Mir, **1989**, 392 p. (in Russ.).
16. Bocharova A.V. Borisenko A.V. *Vestnik KarGU. Serija himicheskaya*. **2005**, 4, 40, 15-21 (in Russ.).
17. Vlasov V.A., Pushkarev A.I., Remnev G.E., Sazonov R.V., Sosnovskij S.A. *Fizika*, **2007**, 311, 2, 75-79 (in Russ.).
18. Pushkarev A.I., Novoselov J.N., Remnev G.E. *Tsepnye processy v nizkotemperaturnoj plazme*. Novosibirsk, Nauka, **2006**, 226 p. (in Russ.).
19. Ladychenko Je.L. *Patent RF RU2323355. Mezhdunarodnaja zayavka (RST) WO 2008/140349. 15.05.2007*. Opubl.27.04.2008, Bjuulleten 12 (in Russ.).
20. Denisov G.V., Novoselov Ju.N., Tkachenko R.M. *Pis'ma v ZhTF*. **2000**, 26, 16, 30-34 (in Russ.).
21. Kompaniec V.Z., Ovsjannikov A.A., Levickij A.A., Polak L.S. *Himicheskie reakcii v turbulentnyh potokah gaza i plazmy*. Nauka, **1978**, 218 p. (in Russ.).
22. Akishev J.S., Pashkin SV., Sokolov N.A. *Fizika plazmy*. **1978**, 4, 4, 858-863 (in Russ.).
23. Afanas'ev S.B., Lavrenjuk D.S., Petrushenko I.N., Stishkov J.K. *Zhurnal teoreticheskoy fiziki*. **2008**, 78, 7, 30-34 (in Russ.).
24. Baranov G.A., Smirnov S.A. *Zhurnal tehnicheskoy fiziki*. **1999**, 69, 11, 42-48 (in Russ.).
25. Smirnov S.A., Baranov G.A. *Zhurnal tehnicheskoy fiziki*. **2001**, 71, 7, 30-38 (in Russ.).
26. Dandaron G.-N.B., Baldanov B.B. *Prikladnaja fizika*. **2007**, 1, 84-86 (in Russ.).
27. Muhamadijarov H.G. *Avtoreferat kandidata himicheskikh nauk*. 01.02.05. Kazan', **2006**, 10 p. (in Russ.).
28. Jashimov M.Ju. *Avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni uchenoj stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk*. **2009**, 20 p. (in Russ.).
29. Vinajkin M.Ju., Zuev D.V., Stishkov Ju.K. *IX Mezhdunarodnaya nauchnaja konferentsia «Electrohydrodynamics of Liquids (MPPEL)»*. Sankt-Peterburg, **2009**, 37-44 (in Russ.).
30. Kuleshov P.S. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005.227.pdf>. 2330-2343
31. Vinnichenko N.A. *Avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk*. **2009**, 10 p. (in Russ.).
32. Kaplan L.G., Otkidychev P.A. *Kosmicheskie issledovaniya*. **2009**, 47, 3, 238-246 (in Russ.).
33. Drozdov A.V. *Materialy VIII International Crimean Conference «Cosmos & Biosphere»*. **2009** (in Russ.).

Борисенко А.В., Мұстафина Г.А., Фазылов С.Д., Молдахметов З.М., Жұрынов М.Ж.

ГАЗТАЗАРТҚЫШ ҚОНДЫРҒЫНЫң (БОРИСЕНКО А.В. ЖҮЙЕСІ)
РЕАКЦИЯЛЫҚ АЙМАҒЫНДАҒЫ ФИЗИКАЛЫҚ-ХИМИЯЛЫҚ ҮДЕРІСТЕР

Тенсіздіктік жүйе жағдайында жоғары қуатты өрісте көміртек, азот, күкірт тотықтарының химиялық түрленістерінің теориялық негіздері қарастырылған. Газтазартқыш Борисенко А.В. қондырғысында (В сериясы) электродтар аралығындағы химиялық үдерістердің үлгісі физикалық-химиялық газодинамиканы ес-кере отырып зерттелді.

Borissenko A.V. , Mustafina G.A., Fazylov S.D., Muldakhmetov Z.M., Zhurinov M.Z.

PHYSICOCHEMICAL PROCESSES IN THE REACTION ZONE OF
GAS CLEANING EQUIPMENT OF A.V. BORISSENKO

This article discusses the theoretical basis of chemical transformations of carbon oxides, nitrogen oxides and sulfur oxides in a high voltage field, non-equilibrium state of the system. The model of chemical processes is considered in the light of physicochemical gas dynamics in the interelectrode area of aeroionic equipment of A.V. Borissenko (series B).