

**VI МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
И ПРИКЛАДНОЙ ПЛАЗМОХИМИИ**

5 – 9 сентября 2011 г. на базе Ивановского государственного химико-технологического университета работал VI Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. Симпозиум был включен в программу мероприятий, приуроченных к Международному году химии.

Очередная встреча плазмохимиков продолжила традиции, начало которым было положено выдающимся ученым, основателем плазмохимии как научной дисциплины Львом Соломоновичем Полаком. В СССР Всесоюзные Симпозиумы по плазмохимии проводились в Москве (1971 г.), Риге (1975 г.), Звенигороде (1979 г.), Днепропетровске (1984 г.). В 1991 Симпозиум изменил название на «Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии» и первый из этой серии состоялся в Риге. С 1995 г. все последующие Симпозиумы (2002, 2005, 2008 и 2011 гг.) проводились на базе ИГХТУ.

В рамках Симпозиума традиционно организуется Школа по плазмохимии, где молодые участники имеют возможность не только представить и обсудить результаты своих исследований с известными учеными, но и прослушать лекции по актуальным проблемам плазмохимии.

В числе организаторов Симпозиума Министерство образования и науки Российской Федерации, Российская академия наук, ряд Научных советов РАН, Объединенное физическое общество РФ, Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Ивановский государственный химико-технологический университет, Институт химии растворов РАН. Финансовая поддержка для проведения Симпозиума оказана Российской академией наук и Российским фондом фундаментальных исследований.

Симпозиум всегда собирает большое количество участников из исследовательских и конструкторских организаций разных стран. В работе настоящего Симпозиума приняло участие около 190 специалистов из академических институтов и вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Иванова, Новосибирска, Ярославля, Самары, Томска, Екатеринбурга, Троицка, Черноголовки и ряда других городов. На Симпозиуме были представлены работы ученых из России, Украины, Беларуси, Казахстана, Чехии, Германии, Франции. Было заслушано 12 пленарных, 54 устных, 55 стендовых докладов.

Тематика Симпозиума охватывала широкий спектр вопросов, связанных с получением, экспериментальным исследованием и моделированием химически активной низкотемпературной плазмы, ее применением для получения новых химических продуктов и модифицирования поверхности материалов и изделий.

По мере развития плазмохимии тематика секций Симпозиума претерпевала изменения, и в сферу рассматриваемых проблем включались новые направления. Такими бурно развивающимися направлениями сегодня являются нанотехнологии и плазменная медицина. Роль плазмы в решении этих новых задач трудно переоценить. Например, если ранее медицинские приложения плазмы сводились к различным способам стерилизации инструментов и материалов, то сейчас использование открывает новые подходы к лечению различных трудноизлечимых заболеваний. Нужно заметить, что Россия была пионером исследований в этой области.

К началу Симпозиума был опубликован сборник трудов (VI Международный Симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (3-9 сентября 2011 г., Иваново, Россия): сборник трудов. Ивановский гос. химико-технологический университет. Иваново. 2011. 430 с. ISBN 978-5-9616-1418-6) в том числе, и в виде электронного издания. С октября 2010 г действует сайт Симпозиума (<http://www.isuct.ru/istapc/>), на котором доступна подробная информация об этом научном мероприятии и тексты представленных докладов. На сайте размещены также труды предыдущих Симпозиумов по плазмохимии, начиная с 1991 г. Следующий Симпозиум решено провести в 2015 г.

В настоящем выпуске журнала «Известия вузов. Серия «Химия и химическая технология» опубликованы статьи по материалам ряда пленарных и секционных докладов, представленных на VI Международном симпозиуме по теоретической и прикладной плазмохимии, которые позволят читателю составить представление о некоторых проблемах плазмохимии, ее возможностях и перспективах.

*Председатель оргкомитета Симпозиума, д.ф.-м.н. Ю.А. Лебедев
(Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН),
Ученый секретарь оргкомитета, д.ф.-м.н. В.А. Титов
(Ивановский государственный химико-технологический университет)*

УДК 533.93 : 537.523.5 : 537.533.75

В.А. Жовтянский

НЕРАВНОВЕСНОСТЬ ПЛОТНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ПЕРЕНОСОМ РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

(Институт газа Национальной академии наук Украины, г. Киев)
e-mail: zhovt@ukr.net

Оценивается роль резонансного излучения плазмообразующих атомов в проблеме отклонения состояния плазмы от равновесного на примере стеночностабилизированной электрической дуги между плавящимися медными электродами в атмосфере. В отличие от общеизвестного учета потерь излучения вне дуги в рассмотрение включен перенос излучения в плазме. Результаты численного моделирования демонстрируют эффекты неравновесия между основным, метастабильным и резонансным энергетическими уровнями атомов меди. Обсуждается роль переноса излучения с точки зрения энергетической эффективности различных устройств, в качестве рабочего тела в которых применяется плазма электрической дуги.

Ключевые слова: плазменно-химические технологии, электрическая дуга, плотная плазма, перенос излучения, частичное локальное термическое равновесие

ВВЕДЕНИЕ

В современной плазмохимии выделилось направление, которое основывается на применении квазиравновесной электродуговой плазмы для нагрева реагентов в процессах конверсии углеродсодержащего сырья, модификации поверхности конструкционных изделий, переработки промышленных, бытовых и медицинских отходов [1].

Электродуговые генераторы в этих технологиях являются чаще всего высокотемпературными источниками тепловой энергии, однако не вызывает сомнений перспектива использования получаемой в них плазмы в качестве реагента. Целенаправленное использование эффектов неравновесности плазмы позволит оптимизировать работу таких генераторов или же уменьшить энергетическую цену производства заряженных частиц в плазменных технологиях. Так или иначе, учет эффектов неравновесности, обусловленных переносом излучения, является необходимым для адекватного моделирования свойств плазмы в электрических дугах.

Обнаружение и обоснование неравновесных свойств электродуговой плазмы атмосферного давления в связи с переносом излучения, о которых пойдет речь в настоящей работе, имеет довольно непростую и длительную историю. Еще в 80-х годах автор со своими сотрудниками в Киевском университете, пользуясь тем обстоятельством,

что плазма дуги в парах меди является удобным объектом для количественной спектроскопии [2, 3], обнаружили следующее. Если в электрической дуге, свободно горящей в атмосфере между медными электродами, аккуратно измерить концентрацию электронов и температуру частиц, то проверочный тест на соответствие давления атмосферному согласно закону Дальтона в стандартном допущении равновесия плазмы дает результат, превышающий ожидаемый в разы. Тогда же мы на основе методов абсорбционной спектроскопии, используя лазер на парах меди, показали, что на периферии дуги и в ближней области вне ее канала имеет место значительное возрастание заселенности метастабильных уровней атома меди, соответствующих нижнему уровню резонансных спектральных линий [4]. Это позволило предположить, что в такой плазме имеет место отклонение от локального термического равновесия (ЛТР) за счет поглощения на периферии канала дуги, где температура относительно мала, резонансного излучения из высокотемпературной осевой зоны. В результате наблюдается частичное ЛТР (ЧЛТР), характеризуемое перезаселенностью резонансного уровня атома меди [5]. Его спецификой является качественно иной характер по отношению к общеизвестной неравновесности в слаботочной газоразрядной плазме, где за счет ухода излучения резонансный уровень плазмообразующих атомов оказывается недозаселенным.

Следует подчеркнуть, что получение этих результатов стало возможным благодаря применению разработанного нами скоростного томографического спектрометра с высоким спектральным разрешением [6], позволяющего постоянно контролировать радиальную структуру дуги. В те годы основная проблема при создании таких спектрометров состояла в обеспечении скоростной регистрации распределения излучения на выходе спектрального прибора, совмещенного с интерферометром Фабри-Перо. Тогда она решалась с помощью диссектора – быстродействующего аналога передающей телевизионной трубки. В настоящее время автор применяет для этих целей матричные детекторы изображения фирмы Hamamatsu (Япония). Последовательное развитие предложенного способа реализации томографических измерений позволяет распространить его и на абсорбционную спектрометрию, в том числе в быстротекающих процессах [7].

Несколько ранее аналогичный по составу плазмы объект – стабилизированная стенкой дуга между испаряемыми электродами – исследовался двумя группами французских исследователей [8, 9]. Наблюдая внешне подобный эффект возрастания содержания паров металла на периферии дуги, они объяснили его разделением в процессе диффузии компонент плазмообразующей смеси (в англоязычной литературе – «demixing»). Оно может быть обусловлено градиентом парциального давления компонент, концентрирующим химические элементы с более высокими энергиями ионизации в высокотемпературных областях плазмы или следствием возникновения сил трения и температурной диффузии, концентрирующих более легкие химические элементы в высокотемпературных областях [10]. Разделение может существенно влиять на состав плазмы, изменяя концентрацию данного элемента в некоторых случаях более чем в три раза.

Дальнейший анализ литературы показал, что и ранее наблюдались отдельные эффекты отклонения от ЛТР вследствие переноса излучения [11, 12], однако они не получили систематического развития. Последнее объективно обусловлено тем, что свободно поддерживаемая между электродами в атмосфере дуга – крайне неудобный для моделирования объект, поскольку в простых моделях тепломассопереноса невозможно обеспечить отвод от нее «на бесконечность» тепловых или диффузионных потоков [13, 14]. Поэтому при моделировании приходится учитывать эффекты конвекции, специального обдува или так называемой стабилизирующей стенки – то есть не характерные для собственно дуги. Даже короткая

дуга в эллиптической модели, которая хорошо ее описывает, не может в рамках равновесного допущения отвести тепло, выделяемое в ее канале при значительных разрядных токах [13]. Вплотную подошли к решению проблемы моделирования переноса излучения и его влияния на термодинамическое состояние плазмы в работах школы физики плазмы Л.М. Бибермана. В условиях весьма ограниченных возможностей вычислительной техники того периода представителями этой школы разработаны весьма эффективные методы приближенных вычислений процессов переноса излучения [15]. К сожалению, эти методы не обеспечивают достаточной точности в областях значительных градиентов параметров плазмы на ее границе, т.е. там, где следует ожидать максимального проявления исследуемых в этой работе эффектов. В настоящее время активные исследования в этом направлении развивают представители школы физики плазмы Санкт-Петербургского государственного университета [16]. В частности, ими развиты методы исследований применительно к двумерной геометрии излучающих объектов.

Значительный пласт исследований, связанных с переносом излучения в плазме представлен в работах 70-х гг. прошлого века в связи с проблемой теплообмена в каналах электрических дуг [17]. Однако в них не рассматривалось влияние излучения на кинетику переходов между энергетическими уровнями плазмообразующих атомов.

Тем не менее, возвращаясь к проблеме «demixing», – предположение о его важной роли не может быть отвергнуто априори. Поэтому далее мы с привлечением специалиста мирового уровня – австралийского ученого Э.Б. Мэрфи [10] провели детальное моделирование диффузионных процессов в плазме электрической дуги между медными электродами и показали, что этот эффект не является существенным [18, 19].

Предварительные оценки показывают, что эффект переноса излучения в дуге может иметь также важное практическое значение. Действительно, дуга позволяет пропускать значительные токи в атмосфере газа или парах металлов при относительно небольших напряжениях или, соответственно, потерях мощности. Дуги «обязаны» этим преимуществом оптимальному сочетанию свойств плазмы, образующей токопроводящий канал [3, 14]. Перезаселение резонансного уровня обуславливает, в конечном итоге, возрастание концентрации электронов на периферии канала. Вследствие этого канал дуги как бы дополнительно «просветляется» с точки зрения возможности пропускания