

**Визуализация СВЧ разряда в жидких углеводородах**К.А. Аверин<sup>1,2</sup>, Ю.А. Лебедев<sup>1</sup>, А.В. Татарин<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт нефтехимического синтеза им А.В. Топчиева РАН<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет)

В последние 15 лет появились публикации, в которых исследуются СВЧ-разряды в газовых пузырях в жидких углеводородах: *n*-додекан, бензол, масло для жарки, машинное масло, масляные отходы, кремнийсодержащее масло, *n*-гептан. Появились первые работы по моделированию таких разрядов и по спектральной диагностике таких разрядов. Причиной интереса к этому типу разряда по данным разных авторов является возможность получения водорода, покрытий, наночастиц и нанотрубок. Поскольку плазма находится внутри жидкости, эффективность физико-химических процессов под действием ее активных частиц и излучения оказывается большой. Соответственно велики и скорости образования продуктов. Однако реальных данных для определения перспектив применения таких разрядов не достаточно. Во всех перечисленных выше работах для создания плазмы используются СВЧ разряды, создаваемые антеннами разных типов. Газовые пузыри создаются либо за счет испарения жидкости, либо барботированием газа (аргон), либо воздействием ультразвука. Суммируя известные результаты можно сказать, что разрядная система существенно неравновесна и является эффективным средством проведения плазмохимических реакций. Но данные отрывочны и систематических исследований проведено не было. В частности, остается открытым вопрос о том, где происходит образование твердой фазы: в плазме, или в жидком углеводороде под воздействием плазмы. Это и было одной из основных задач проведенного исследования.

Экспериментальная установка подробно описана в [1, 2]. Она представляла собой металлическую камеру, в которую с помощью прямоугольного волновода подводилась СВЧ энергия от магнетрона (2.45 ГГц, 500 Вт). В камеру помещали изготовленный из жаропрочного стекла стакан, в котором располагалась четвертьволновая СВЧ антенна (диаметр 1.5 мм) на металлическом основании. Длина антенны рассчитывается по длине волны СВЧ сигнала в жидком углеводороде. Использовались неполярные углеводороды, у которых диэлектрическая постоянная на частоте СВЧ сигнала приблизительно равна 2. Это позволяло работать с разными углеводородами без изменения длины антенны. Углеводород (объем порядка 50 мл) заливался в стакан и полностью закрывал антенну. Использовались углеводороды: *n*-гептан (0,383 мм<sup>2</sup>/с) и масла (И-20, И-50, С-9, М-9С,

ВМ-4, МС-20) с вязкостями в диапазоне 6,5-11 мм<sup>2</sup>/с. Пространство над поверхностью жидкости постоянно промывалось потоком газообразного аргона. При подаче СВЧ энергии в области максимального СВЧ поля на конце антенны происходил ее разогрев, углеводород испарялся и в образовавшемся газовом пузыре инициировался СВЧ разряд.

Визуализация горения разряда осуществлялась с помощью видеокамеры Canon PowerShot SX50HS в режиме «сверхскоростная съемка видеофильмов для сверхзамедленного воспроизведения» (240 кадров в секунду). Кроме того, проводилась фотосъемка обработанного в плазме углеводорода с образованными углеродными частицами сразу после проведения эксперимента. Это позволило при использовании вязких углеводородов проследить области образования углеродных частиц.

На основе анализа фотографий показано, что углеродные частицы образуются в области газового пузыря у антенны и процесс инициируется СВЧ разрядом. Затем частицы переносятся в жидкость и на поверхности образуют форму вихря. Установлено, что размер газового пузыря, образованного СВЧ разрядом в *n*-гептане составляет 2.5 мм, а скорость его подъема в жидкости около 15 см/с. Это согласуется с результатами, полученными при моделировании разряда.

Прикладные научные исследования, описанные в данной статье, проводятся при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы", уникальный идентификатор прикладного научного исследования RFMEFI57514X0060.

## Литература

- [1]. *Buravtsev N.N., Konstantinov V.S., Lebedev Yu.A., Mavlyudov T.B.* Microwave discharge in liquid heptane //Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Edited by Yu.A. Lebedev. - Yanus-K – 2012 - P. 167-170.
- [2]. *Lebedev Yu. A., Epstein I. L., Shakhatov V. A., Yusupova E. V., Konstantinov V. S.* Spectroscopy of Microwave Discharge in Liquid C7–C16 Hydrocarbons. - High Temperature – 2014 - V. 52 - P. 319-327.
- [3]. *Ю. А. Лебедев, В. С. Константинов, М. Ю. Яблоков, А. Н. Щеголихин, Н. М. Сурин.* СВЧ плазма в жидком *n*-гептане: исследование продуктов плазмохимических реакций - Химия высоких энергий - 2014 - Т. 48 - С. 496-499.