

\* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-03-00006 (электрохимические исследования) и № 20-03-00471 (ДФПГ-, SUPRAC-тесты).

УДК 66.097

М. В. Попов<sup>1,2</sup>, А. Г. Баннов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН,  
119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр., 47,  
porovtakhvik@gmail.com,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

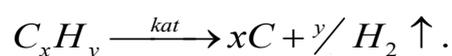
## ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР РАЗЛОЖЕНИЕМ ПРОПАНА НА NI-СОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИЗАТОРАХ\*

**Ключевые слова:** пропан, гетерогенный катализ, углеродные нановолокна, разложение углеводородов, катализатор.

Анализ состояния современной nanoиндустрии показал, что в настоящее время углеродные наноматериалы востребованы во многих отраслях промышленности, при этом требуется технологический прорыв в создании данных материалов в промышленном масштабе. На данный момент технологического прорыва не будет из-за дороговизны методов синтеза углеродных наноматериалов. Поэтому актуальной задачей является поиск решений, позволяющих получать углеродные наноматериалы надлежащего качества и приемлемой стоимости.

Одним из ряда способов получения углеродных наноматериалов является процесс каталитического разложения *органических веществ* – легких углеводородов, таких как метан, пропан, бутан, этан, этилен, пропилен и их смесей [1, 2]. Данная работа посвящена исследованию разложения пропана на Ni-содержащих катализаторах. В результате процесса каталитического разложения пропана образуется углеродный наноматериал, преимущественно состоящий из углеродных нановолокон (УНВ). УНВ могут применяться в качестве носителя катализатора, катализатора селективного окисления сероводорода в серу, электродного материала для суперконденсаторов, а также может использоваться в качестве газочувствительного материала, применяемого в газовых сенсорах [3].

Уравнение реакции каталитического разложения углеводорода выглядит следующим образом:



В работе использовались 4 типа высокопроцентных Ni-содержащих катализаторов, приготовленных методом гетерофазного золь-гель синтеза [4]. Высокая дисперсность и стабильность металлической фазы обеспечивалась за счет применения SiO<sub>2</sub> в качестве носителя катализатора.

Составы катализатора: 50Ni-40X/10SiO<sub>2</sub>(масс.%), где X – Cu, Mo, Co, Fe.

Восстановленные и пассивированные катализаторы исследовались с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2010 (JEOL) с разрешением на решетке 0.14 нм при ускоряющем напряжении 200 кВ. Фазовый состав каталитических частиц анализировался методом локального энерго-дисперсионного рентгеновского микроанализа (EDX-анализ) при помощи спектрометра EDAX (EDAX Co.), оснащенного Si (Li) детектором с энергетическим разрешением 130 эВ. Эксперименты проводились в проточной каталитической установке BTRS Jn (“Autoclave Engineers”, США) при температуре процесса 600 °С и давлениях 1.0, 3.0, 5.0 бар.

Установлено, что углеродные нановолокна, образующиеся в процессе каталитического разложения пропана, соответствуют структурным типам «рыбий скелет» и «колода карт». Вместе с тем достаточно сложно выделить морфологические особенности полученных образцов УНВ, проявляющихся в зависимости от состава катализатора. Укрупнение волокон может происходить в самом начале реакции за счет слияния нескольких мелких частиц катализатора в одну под воздействием температуры. Также наблюдаются плотные волокна с наличием неструктурированного или турбостратного углерода, который осаждается на поверхности волокон из газовой фазы в результате гомогенного разложения углеводородов.

Также по результатам исследования наиболее эффективным по количеству получаемых углеродных наноструктур показал себя катализатор, содержащий медь в качестве промотирующей добавки. Так как эксперимент считался завершенным при снижении активности катализатора, можно говорить и о показателе эффективности по продолжительности жизни катализатора. Время жизни никель-медного катализатора составило не менее 24 часов, а выход углеродных наноструктур составил не менее 1000 г/г<sub>кат</sub>.

### Список литературы

1. *Kuvshinov G. G., Parmon V. N., Sadykov V. A, Sobyenin V. A.* New catalysts and catalytic processes to produce hydrogen and syngas from natural gas and other light hydrocarbons // *Studies in Surface Science and Catalysis*. 1998. Vol. 119. P. 677.
2. *Kuvshinov G. G., Popov M. V., Tonkodubov S. E., Kuvshinov D. G.* Effect of pressure on the efficiency of nickel and nickel-copper catalysts in decomposition of methane // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2016. Vol. 89, № 11. P. 1777–1785.
3. *Bannov A. G., Jasek O., Prasek J. et al.* Enhanced ammonia adsorption on

directly deposited nanofibrous carbon films // Journal of Sensors. 2018. Vol. 2018. Art. 7497619. 14 p.

4. *Ermakova M. A., Ermakov D. Y.* Ni/SiO<sub>2</sub> and Fe/SiO<sub>2</sub> catalysts for production of hydrogen and filamentous carbon via methane decomposition // Catalysis Today. 2002. Vol. 77. P. 225–235.

\* Работа выполнена частично для госзадания FSUN-2020-0008.

УДК 547.241

**А. А. Прищенко, Р. С. Алексеев, М. В. Ливанцов,  
О. П. Новикова, Л. И. Ливанцова, В. С. Петросян**

*Химический факультет, Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова,  
119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1/3,  
aprishchenko@yandex.ru*

## **НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫЕ АРИЛ- И ГЕТАРИЛАМИНОМЕТИЛЕНБИСФОНОВЫЕ КИСЛОТЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ БИОАКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА И ПОЛИДЕНТАТНЫЕ ЛИГАНДЫ\***

**Ключевые слова:** аминометиленбисфосфоновые кислоты, арил- и гетариламины, трис(триметилсилил)фосфит, триметилсилилтрифлат.

Функционализированные метиленбисфосфоновые кислоты и их производные с ароматическими и гетероциклическими фрагментами являются хорошо известными биомиметиками гидрокси- или аминокарбоновых кислот и природных пиррофосфатов, а некоторые из них, такие как золедроновая, ризедроновая и минодроновая кислоты, широко используются в медицине. Эти соединения проявляют свойства гербицидов, пестицидов, антибиотиков, противовирусных и противоопухолевых веществ, а также ингибиторов ферментов. Используемая нами кремнийорганическая методология синтеза функционализированных фосфорорганических кислот является удобным методом создания связей Р-С. В последнее время эта методология была успешно разработана и стала современным направлением в химии фосфорорганических соединений [1–3].

Удобный метод синтеза новых функционализированных арил- и гетариламинометиленбисфосфоновых кислот предложен нами на основе кремнийорганической методологии. Так, целевые функционализированные