

# ОДНОКОМПОНЕНТНЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ СИНТЕЗА СМЕСИ $H_2$ И $CO$ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА МЕТАНА

Г.Е. Ергазиева<sup>1,3\*</sup>, Р.Х. Тургумбаева<sup>2</sup>, М.М. Тельбаева<sup>1</sup>, А.А. Розиев<sup>2</sup>, К.М. Сахиева<sup>2</sup>, К. Досумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем горения, ул. Богенбай Батыра 172, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби 71, Алматы, Казахстан

Дата поступления:

4 мая 2020

## АННОТАЦИЯ

Принято на печать:

8 июня 2020

Доступно онлайн:

30 июня 2020

УДК: 54-44; 546.7; 546.11

В реакции углекислотной конверсии метана до синтез-газа исследованы однокомпонентные катализаторы на основе оксидов ( $NiO$ ,  $Co_2O_3$  и  $MoO_3$ ), нанесенные на различные носители ( $\theta-Al_2O_3$ ,  $\gamma-Al_2O_3$ , 5A, 4A, 3A, 13X, HY и HZSM-5). Определен оптимальный состав катализатора на основе оксида никеля с содержанием на носителе 3 масс.%, оксида кобальта – 15 масс.% и оксида молибдена – 10 масс.%. Изучено влияние методов приготовления на активность эффективного 3 масс.%  $NiO/\gamma-Al_2O_3$  катализатора в реакции углекислотной конверсии метана в  $H_2$  и  $CO$ . Для никелевого катализатора с низким содержанием активной фазы выбран оптимальный способ приготовления (метод капиллярной пропитки носителя по влагоемкости). На 3 масс.%  $NiO/\gamma-Al_2O_3$  катализаторе при условии реакции  $CH_4:CO_2 = 1:1$ ,  $T_p = 800$  °C,  $W = 1500$  ч<sup>-1</sup> значения конверсии и выхода целевых продуктов составляют:  $X_{CH_4} = 89\%$ ,  $X_{CO_2} = 93\%$ ,  $C(H_2) = 45,4\%$ ,  $C(CO) = 42,4\%$ .

*Ключевые слова:* катализатор, метан, диоксид углерода, конверсия, синтез-газ.

## Введение

Водород является важным сырьем в химической и нефтяной промышленности. Он используется в производстве аммиака, метанола и др., а также в различных процессах гидроочистки нефти. Возможность использования водорода как экологически чистого источника энергии общего назначения для отопления помещений, выработки электроэнергии и использования в качестве транспортного топлива может привести к огромному увеличению потребности в водороде [1]. Следует также отметить, что водород представляет наиболее чистым из всех существующих топлив.

В настоящее время конверсия природного газа и других легких углеводородов с помощью паровой конверсии является основным процессом получения водорода. Водород высокой чистоты получают электролизом воды, однако данный метод не станет конкурентоспособным в ближайшем будущем из-за высоких энергетических затрат.

В последнее время способ углекислотной конверсии природного газа метана в водород и/или синтез-газ является широко исследуемым в области экологического катализа. Углекислотная конверсия метана (УКМ) представляет особый инте-

рес по ряду причин: в качестве исходного сырья в нем используются два основных парниковых газа ( $CO_2$  и  $CH_4$ ), соотношение  $H_2/CO$  в продуктах реакции близка к единице, это соотношение синтез-газа подходит для синтеза Фишера-Тропша [2], кроме того УКМ дает возможность для широкого использования возобновляемого биогаза, содержащий метан и диоксид углерода, получаемого путем сбраживания биомассы.

Согласно литературе [3-5] реакция углекислотной конверсии метана протекает по окислительно-восстановительному механизму. Известно [4], что в окислительно-восстановительных реакциях наибольшей активностью обладают элементы с частично незаполненной d-оболочкой, то есть переменной валентности. Для наших исследований были выбраны оксиды металлов Ni, Mo и Co. В качестве носителей для этих катализаторов используют в основном синтетические носители. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с природными глинами и цеолитами: постоянный химический состав, возможность регулирования пористой структуры для получения высокоактивного катализатора, возможность получения катализатора в виде гранул или другой заданной формы [6]. Поэтому в наших исследованиях в качестве носителей ката-

\*Ответственный автор

E-mail: ergazieva\_g@mail.ru (Г.Е. Ергазиева).

лизаторов были выбраны синтетические носители, такие как оксиды алюминия ( $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и цеолиты (5A, 4A, 3A, 13X, HY, HZSM-5).

Влияние метода приготовления катализаторов на их активность и селективность в реакции углекислотной конверсии метана в  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  является важным направлением в катализе [7]. Приготовление образцов высокодисперсных нанесенных катализаторов на основе новых методов должно позволить проводить более глубокую оценку эффектов нанесения и промотирования. Однако отсутствие достаточно хорошо разработанной теории каталитических процессов не позволяет заранее устанавливать рациональную методику приготовления активных катализаторов, и поэтому до сих пор при разработке катализаторов для практического применения приходится идти опытным путем.

Целью настоящей работы являлось выбор эффективного носителя и разработка высокоэффективного однокомпонентного катализатора с низким содержанием активной фазы на носителе, а также определение эффективного метода приготовления низкопроцентных катализаторов.

## Экспериментальная часть

Катализаторы готовили методом глубокой пропитки носителя (МГП), а также капиллярной пропитки носителя по влагоемкости (МКП) растворами азотнокислых солей металлов переменной валентности.

Суть способа капиллярной пропитки носителя ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) по влагоемкости водным раствором азотнокислых солей заключается в том, что носитель пропитывается по его влагоемкости растворами солей металлов, и активная фаза концентрируется на поверхности в виде «корочки». Метод обычной пропитки носителя осуществляется традиционно погружением носителя в раствор солей металлов до

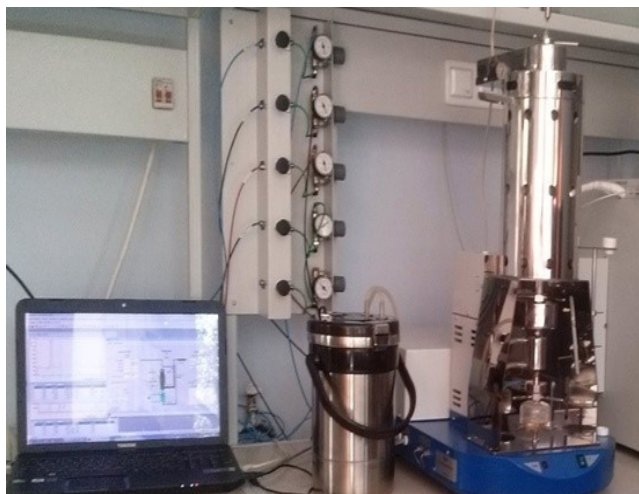


Рис. 1. Автоматизированная проточная установка.

глубокой пропитки носителя. Катализаторы были просушены при  $300\text{ }^\circ\text{C}$  (2 ч) и прокалены при  $500\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 3 ч [8].

Тестирование активности носителей и синтезированных катализаторов в процессе углекислотной конверсии метана в  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  проводилось на лабораторной установке проточного типа (рис. 1). Смешанный газ ( $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 1:1$ ) подавался со скоростью  $50\text{ см}^3/\text{мин}$  в кварцевый реактор с катализатором сверху, после прохождения реактора смесь образованных продуктов реакции идет на хроматограф для идентификации.

Исследование активности носителей и катализаторов в процессе УКМ проводили в интервале температур  $600\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$ , объемной скорости реакции  $500\text{--}4000\text{ ч}^{-1}$ , при атмосферном давлении. Количественный анализ исходных реагентов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ) и продуктов реакции ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и т.д.) анализировались хроматографическим методом на хроматографе «ХРОМОС-1000» с детектором по теплопроводности и пламенно-ионизационным детектором.

## Результаты и их обсуждение

В УКМ были исследованы отдельно носители ( $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 5A, 4A, 3A, 13X, HY и HZSM-5), тестирование активности носителей проводили при  $W = 1500\text{ ч}^{-1}$ ,  $\text{CH}_4:\text{CO}_2 = 1:1$ , в температурном интервале  $600\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$ . Результаты экспериментов показали, что наибольшая конверсия  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  происходит на носителе  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Самая низкая конверсия метана и диоксида углерода наблюдается на цеолитах 4A и 5A, конверсия метана составляет около 9-10%.

По активности в конверсии метана, изученные носители располагаются в следующей последовательности:  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20%) = HY (20%) >  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (18%) > 13X (17%) > 3A (15%) > HZSM-5 (13%) > 5A (10%) > 4A (9%).

В конверсии диоксида углерода:  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20%) >  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (18%) > 13X (17%) = HZSM-5 (17%) > 3A (15%) > HY (13%) > 5A (9%) > 4A (8%).

На носители, показавшие наиболее высокие показатели конверсии метана и диоксида углерода ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , HY, 13X и 5A) были нанесены оксиды металлов (Ni, Mo, и Co). Сравнительные результаты представлены на рис. 2, условия реакции:  $\text{CH}_4:\text{CO}_2 = 1:1$ ,  $T_p = 800\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 1500\text{ ч}^{-1}$ .

Активность оксидов ( $\text{NiO}$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$  и  $\text{MoO}_3$ ) в реакции УКМ увеличивается с нанесением их на оксид алюминия  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Наибольшие показатели по конверсии и по выходам целевых продуктов наблюдаются для катализатора 3 масс.%  $\text{NiO}/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\text{XCH}_4 = 89\%$ ,  $\text{XCO}_2 = 93\%$ ,  $\text{C}(\text{H}_2) = 45,4\%$ ,  $\text{C}(\text{CO}) = 42,4\%$ .

В следующей серии экспериментов было изучено влияние содержания оксида никеля, оксида молибдена и оксида кобальта, нанесенных на эффективный носитель  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , на направление процесса УКМ.

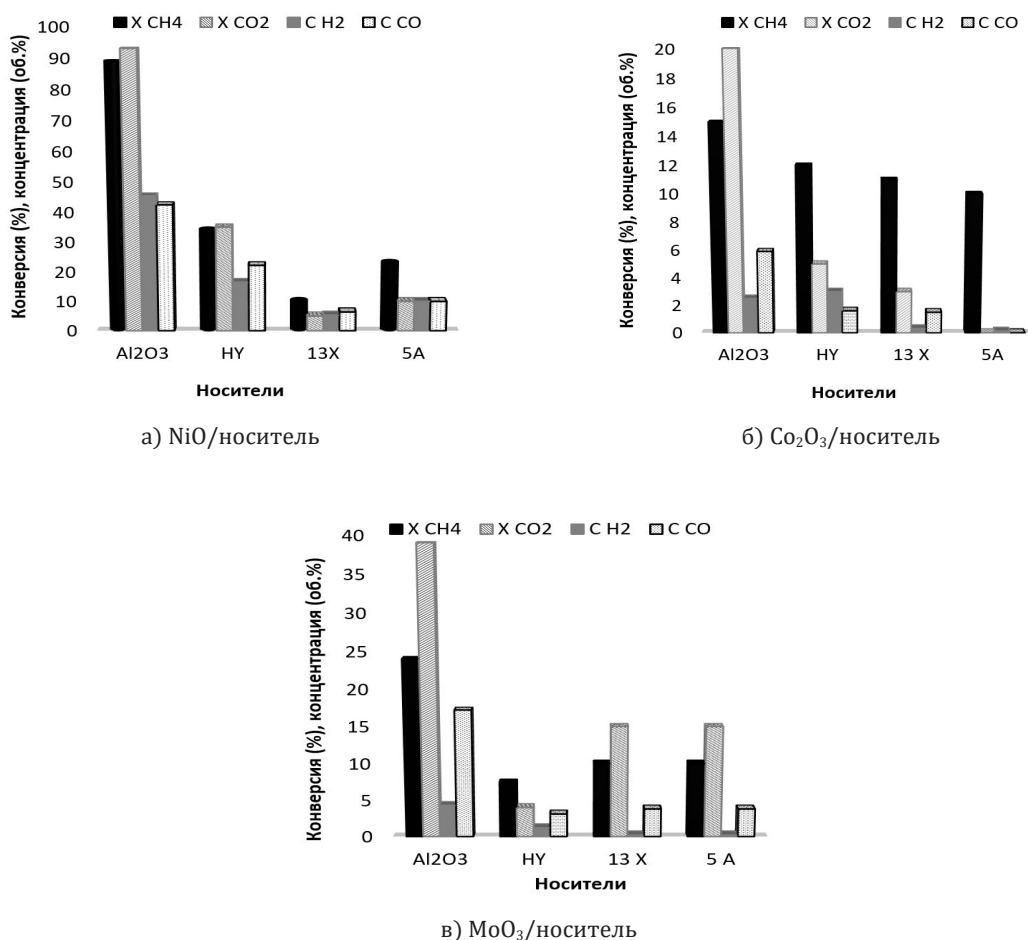


Рис. 2. Влияние природы носителя на активность оксидов (NiO, Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MoO<sub>3</sub>) в реакции углекислотной конверсии метана до синтез-газа.

Содержание оксидов на носителе варьировалось в интервале от 1 до 20 масс.%. Активность синтезированных катализаторов в процессе УКМ изучалась в интервале температур 600-850 °С. На рисунке 3 приведены результаты, полученные при оптимальной температуре реакции – 800 °С.

Как видно из рисунка 3, при повышении содержания оксида молибдена на носителе от 1 до 20 мас.% идет повышение конверсии диоксида углерода от 19 до 48%, при этом увеличение концентрации CO и H<sub>2</sub> в продуктах реакции незначительное. С увеличением содержания оксида никеля от 1 до 3 масс.% идет резкое повышение конверсии метана и диоксида углерода, а также концентрации водорода и оксида углерода в продуктах реакции. При этом показатели конверсии и концентрации целевых продуктов реакции УКМ для наиболее активного катализатора 3 масс.% NiO/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляют: XCH<sub>4</sub> – 89%, XCO<sub>2</sub> – 93%, С (H<sub>2</sub>) – 45,4%, С (CO) – 42,4%. Селективность по целевым продуктам составляет – S (H<sub>2</sub>) – 50%, S (CO) – 47,5%. Дальнейшее повышение содержания оксида никеля на носителе от 3 до 20 масс.% не влияет на показатели реакции. Влияние содержания оксида кобальта на направление УКМ по сравнению с оксидом никеля имеет другой

характер. Наибольшая активность оксида кобальта в процессе УКМ проявляется при высоких его концентрациях на носителе, 15 масс.% и 20 масс.% Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При содержании оксида кобальта на носителе 15 масс. %, конверсия метана составляет 95%, диоксида углерода – 90%, концентрации водорода и монооксида углерода достигают 45 и 42 об.% соответственно. При этом селективность по целевым продуктам составляет – S (H<sub>2</sub>) – 49,5%, S (CO) – 46,6%.

Далее было исследовано влияние метода приготовления на активность эффективного 3 масс.% NiO/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> катализатора в реакции углекислотной конверсии метана. Катализатор 3 масс.% NiO/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> был приготовлен также методом глубокой пропитки. Сравнительные результаты активности 3 масс.% NiO/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> катализатора синтезированного методом глубокой пропитки и методом капиллярной пропитки носителя представлены на рис. 4. Катализаторы были протестированы в реакции углекислотной конверсии метана в интервале температур 600-850 °С. На рис. 4 приведены результаты, полученные при условии реакции W = 1500 ч<sup>-1</sup>, CH<sub>4</sub> : CO<sub>2</sub> = 1 : 1, T = 800 °С.

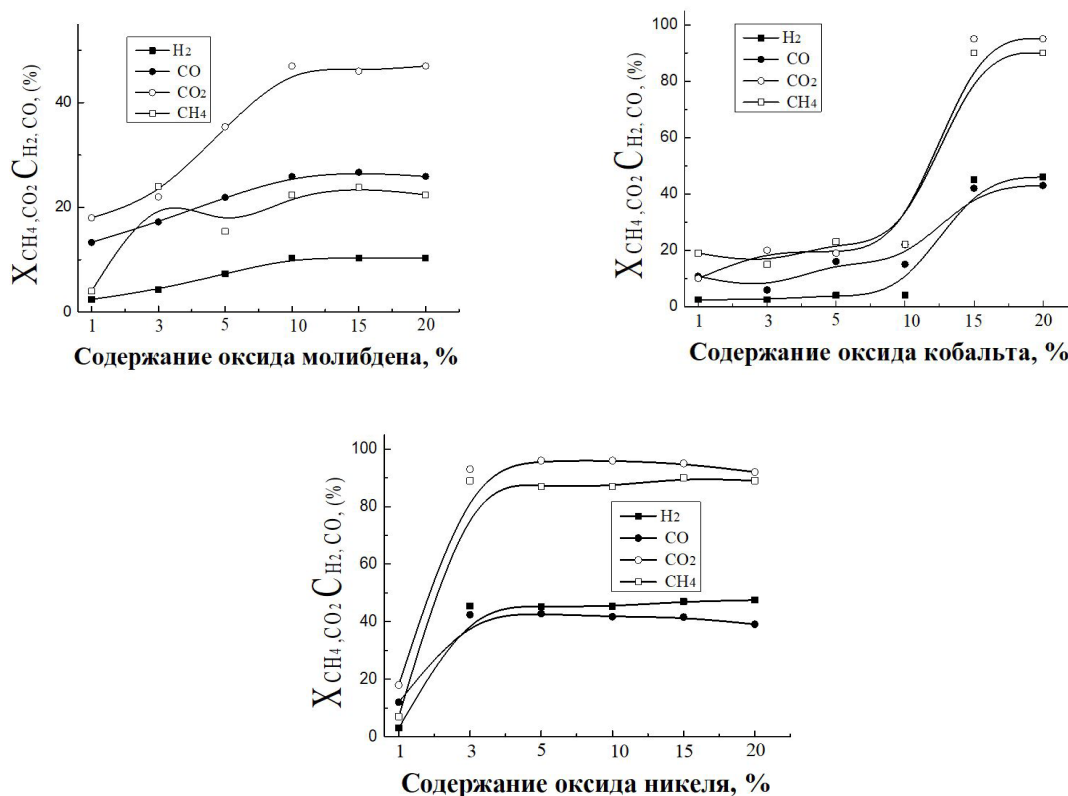


Рис. 3. Влияние содержания оксида молибдена, оксида кобальта и оксида никеля на носителе  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , на конверсию исходных реагентов и выход продуктов реакции УКМ.

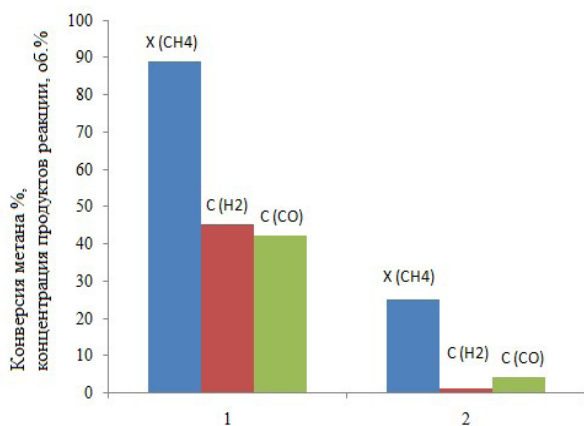


Рис. 4. Влияние метода приготовления 3 масс.% NiO/ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  катализатора на его активность в реакции УКМ: 1 – метод капиллярной пропитки; 2 – метод глубокой пропитки.

Как видно из рис. 4, катализатор, приготовленный методом капиллярной пропитки носителя по влаге, является активным в реакции УКМ по сравнению с катализатором, синтезированным методом глубокой пропитки. Повышение активности катализатора, приготовленного методом капиллярной пропитки, возможно связано с распределением активного компонента по внешней поверхности гранулы. Так как концентрация активной фазы мала (3 масс.%) и распределение ее по внеш-

ней поверхности носителя ведет к более легкому взаимодействию исходных компонентов (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) с активными фазами 3 масс.% NiO/ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  катализатора. Синтезирование катализатора методом глубокой пропитки приводит к распределению активного компонента по объему гранулы, что приводит к затруднению для взаимодействия CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> с активными фазами никелевого катализатора.

Таким образом, определено влияние природы носителей (синтетические оксиды алюминия  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  и цеолиты 5A, 4A, 3A, 13X, HY, HZSM-5) на направление реакции углекислотной конверсии метана. По активности в конверсии метана, изученные носители располагаются в следующей последовательности:  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (20%) = HY (20%) >  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  (18%) > 13X (17%) > 3A (15%) > HZSM-5 (13%) > 5A (10%) > 4A (9%). Для нанесения активной фазы катализатора для процесса УКМ выбраны более эффективные носители ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 13X, HY).

В качестве активной фазы исследованы оксиды Ni, Mo и Co, тестирование активности данных оксидов показало, что наиболее эффективными в реакции углекислотной конверсии метана в водород и монооксид углерода являются катализаторы на основе оксидов никеля и кобальта. Определен оптимальный состав катализатора на основе оксида никеля, с содержанием на носителе 3 масс.%, и оксида кобальта – 15 масс.%. При условии реакции CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> = 1:1, T<sub>p</sub> – 800 °C, W = 1500 ч<sup>-1</sup> значения конверсии,

выхода целевых продуктов и селективности составляют: для катализатора 3 масс.% NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: X<sub>CH<sub>4</sub></sub> – 89%, X<sub>CO<sub>2</sub></sub> – 93%, C (H<sub>2</sub>) – 45,4%, C (CO) – 42,4%. Селективность по целевым продуктам – S (H<sub>2</sub>) – 50%, S (CO) – 47,5%. Для 15 масс.% Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: X<sub>CH<sub>4</sub></sub> – 95%, X<sub>CO<sub>2</sub></sub> – 90%, C (H<sub>2</sub>) – 45%, C (CO) – 42%. Селективность по целевым продуктам – S (H<sub>2</sub>) – 49,5%, S (CO) – 46,6%.

Изучено влияние методов приготовления (метод глубокой пропитки, метод капиллярной пропитки) на активность наиболее эффективного 3 масс.% NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> катализатора в реакции углекислотной конверсии метана. Для 3 масс.% NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> катализатора выбран оптимальный способ приготовления (метод капиллярной пропитки носителя по влагоемкости) который благодаря распределению активного компонента (NiO, Ni) по внешней поверхности гранулы позволил повысить его каталитическую активность для получения синтез-газа углекислотной конверсией метана. При условии реакции CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> = 1:1, T<sub>p</sub> – 800 °C, W = 1500 ч<sup>-1</sup> значения конверсии, выхода целевых продуктов и селективности составляют: X<sub>CH<sub>4</sub></sub> – 89%, X<sub>CO<sub>2</sub></sub> – 93%, C (H<sub>2</sub>) – 45,4%, C (CO) – 42,4 %. Селективность по целевым продуктам – S (H<sub>2</sub>) – 50%, S (CO) – 47,5%.

## Список литературы

- [1]. Chen X., Shen S., Guo L., Mao S.S. Semiconductor-based Photocatalytic Hydrogen Generation // *Chemical Reviews* (Washington, DC, United States). – 2010. – Vol. 110, No 11. – P. 6503–6570.
- [2]. Chike George Okoye-Chine, Mahluli Moyo, Xinying Liu, Diane Hildebrandt. A critical review of the impact of water on cobalt-based catalysts in Fischer-Tropsch synthesis// *Fuel Processing Technology* – 2019 – Vol.192, P. 105-129.
- [3]. Shao H., Kugler E. L., Ma W., Dadyburjor D. B. Effect of temperature on structure and performance of in-house cobalt-tungsten carbide catalyst for dry reforming of methane // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005. Vol. 44. P. 4914–4921.
- [4]. Dossumov, K., Yergazyeva, Y.G., Myltykbayeva, L.K., Telbayeva, M.M. Dry reforming of methane on carriers and oxide catalysts to synthesis-gas // *Eurasian Chemico-Technological Journal* – 2018 – Vol. 20 – P. 131-136.
- [5]. D. San-José-Alonso, J. Juan-Juan, M.J. Illán-Gómez, M.C. Román-Martínez. Ni, Co and bimetallic Ni-Co catalysts for the dry reforming of methane // *Applied Catalysis A: General*. 2009 Vol. 371, P. 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.09.026>
- [6]. Колесников И.М. Катализ и производство катализаторов. – М.:Техника, 2004. – 400 с.
- [7]. Won-Jun Jang, Jae-Oh Shim, Hak-Min Kim, Seong-Yeun Yoo, Hyun-Seog Roh. A review on dry reforming of methane in aspect of catalytic properties // *Catalysis Today*. 2019 Vol. 324. P. 15-26
- [8]. K. Dossumov, G.E. Ergazieva, B.T. Ermagambet, L.K. Myltykbayeva, M.M. Telbayeva, A.V. Mironenko, M.M. Mambetova, and G. Kasenova. Morphology and Catalytic Properties of Cobalt-Containing Catalysts Synthesized by Different Means// *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2020, Vol. 94, No. 4, pp. 880–882.

## Single-component catalysts for the synthesis of mixture H<sub>2</sub> and CO from natural gas- methane

G.E. Ergazieva<sup>1,3</sup>, R.Kh. Turgumbaeva<sup>2</sup>, M.M. Telbayeva<sup>1</sup>, Roziev A.A.<sup>2</sup>, Sakhieva K.M.<sup>2</sup>, Dossumov K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kazakh National Pedagogical University named after Abay, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

## ABSTRACT

One-component catalysts based on oxides (NiO, Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MoO<sub>3</sub>) supported on various supports ( $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5A, 4A, 3A, 13X, HY, and HZSM-5) have been studied in the reaction of carbon dioxide conversion of methane to synthesis gas. The optimal composition of a catalyst based on nickel oxide with a support content of 3 wt%, cobalt oxide – 15 wt% and molybdenum oxide – 10 wt% was determined. The effect of preparation methods on the activity of an effective 3 wt% NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in the reaction of carbon dioxide conversion of methane to H<sub>2</sub> and CO was studied. For a nickel catalyst with a low content of the active phase, an efficient preparation method was chosen (the method of capillary impregnation of the support in terms of moisture capacity). On an effective 3 wt.% NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> under the reaction conditions CH<sub>4</sub>: CO<sub>2</sub> = 1: 1, T<sub>r</sub> – 800 °C, W = 1500 h<sup>-1</sup>, the values of conversion and yield of the target products are: X<sub>CH<sub>4</sub></sub> – 89%, X<sub>CO<sub>2</sub></sub> – 93%, C (H<sub>2</sub>) – 45.4%, C (CO) – 42.4%.

## Табиғи газ метаннан H<sub>2</sub> мен CO қоспасын синтездеуге арналған біркомпонентті катализаторлар

Г.Е. Ергазиева<sup>1,3</sup>, Р.Х. Турғумбаева<sup>2</sup>, М.М. Тельбаева<sup>1</sup>, А.А. Розиев<sup>2</sup>, К.М. Сахиева<sup>2</sup>, К. Досумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

## АНДАТПА

Метанның синтез газға дейінгі көмірқышқылдық конверсиясында әр-түрлі ( $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5A, 4A, 3A,

13X, HY және HZSM-5) тасымалдағыштарға отырғызылған NiO, Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> және MoO<sub>3</sub> оксидтер негізінде бір-компонентті катализаторлар зерттелді. Тасымалдағыштың құрамында 3 масс.% никель оксиді, 15 масс.% кобальт оксиді және 10 масс.% молибден оксиді негізіндегі оңтайлы катализатордың құрамы анықталды. Метанның H<sub>2</sub> мен CO-ға көмірқышқылдық конверсиясы реакциясында эффективті 3 масс.% NiO/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> катализаторының белсенділігіне дайындау әдістерінің әсері зерттелді. Никельді

катализаторы үшін метанның көмірқышқылдық конверсиясы арқылы H<sub>2</sub> мен CO алу үшін каталитикалық белсенділігін арттыратын эффективті әдіс (тасымалдағышты ылғал сиымдылығы бойынша капиллярлы сіңіру әдісі) таңдалды. Эффективті 3 масс.% NiO/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> катализаторында реакцияның жағдайы CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> = 1:1, T<sub>p</sub> – 800 °C, W = 1500 сағ<sup>-1</sup> болғанда конверсия мәні мен мақсатты өнімдердің шығымы – X<sub>CH<sub>4</sub></sub> – 89%, X<sub>CO<sub>2</sub></sub> – 93%, C (H<sub>2</sub>) – 45,4%, C (CO) – 42,4 % құрайды.