

УДК 661.725.4

<https://doi.org/10.24411/2310-8266-2020-10203>

Повышение энергетической эффективности производства бутиловых спиртов методом гидроформилирования

М.В. Масленникова, М.Х. Сосна, О.Л. Елисеев, Е.А. Шаврина

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 119991, Москва, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9208-2757>, E-mail: marymaslen@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9609-1055>, E-mail: dr.michael.sosna@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1052-9237>, E-mail: oleg@ioc.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3519-0986>, E-mail: shavrina.2016@list.ru

Резюме: Рассмотрены методы получения синтез-газа для осуществления гидроформилирования с целью определения наиболее энергоэффективного из них. Проанализированы такие технологии получения синтез-газа, как конверсия в трубчатых печах и автотермическая конверсия «Тандем». Изучены варианты проведения процесса оксосинтеза при высоком и низком давлении. Определены факторы, влияющие на получение синтез-газа требуемого состава. Рассмотрены варианты применения циркуляции углекислого газа и привлечения его со стороны с целью увеличения доли окиси углерода в синтез-газе. Проанализирована возможность использования мембранных блоков для выделения синтез-газа требуемого состава. Исходя из проведенного сравнения рассматриваемых методов предложено использование технологии «Тандем» с привлечением углекислого газа со стороны. Данный метод позволит повысить эффективность производства синтез-газа, а следовательно, и оксосинтеза за счет снижения расхода природного газа.

Ключевые слова: оксосинтез, гидроформилирование, бутиловые спирты, трубчатая печь, «Тандем», синтез-газ, производство синтез-газа, парогликоксидная конверсия, циркуляция углекислого газа, конверсия природного газа, соотношение водород : окись углерода, энергетическая эффективность.

Для цитирования: Масленникова М.В., Сосна М.Х., Елисеев О.Л., Шаврина Е.А. Повышение энергетической эффективности производства бутиловых спиртов методом гидроформилирования // НефтеГазХимия. 2020. № 2. С. 13–17.

DOI:10.24411/2310-8266-2020-10203

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF BUTYL ALCOHOL PRODUCTION BY HYDROFORMYLATION

Marya V. Maslennikova, Michael KH. Sosna, Oleg L. Eliseev, Ekaterina A. Shavrina

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 119991, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9208-2757>, E-mail: marymaslen@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9609-1055>, E-mail: dr.michael.sosna@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1052-9237>, E-mail: oleg@ioc.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3519-0986>, E-mail: shavrina.2016@list.ru

Abstract: The purpose of the research was to examine methods for producing synthesis gas for hydroformylation to determine the most energy efficient. The technologies for producing synthesis gas were distinguished: conversion in tube furnaces and the Tandem technology. The variants of the process of oxosynthesis were studied: at high and low pressure. The factors affecting the production of synthesis gas of the required composition are determined. Variants of using carbon dioxide circulation and attracting it from the side to increase the proportion of carbon monoxide in synthesis gas are considered. The possibility of using membrane blocks to isolate the synthesis gas of the required composition was analyzed. The results of the study show that the use of Tandem technology with the attracting CO₂ from the outside will increase the efficiency of synthesis gas production and oxosynthesis by reducing the consumption of natural gas.

Keywords: oxosynthesis, hydroformylation, butyl alcohol, tube reactor, Tandem, synthesis gas, synthesis gas production, steam-carbon dioxide conversion, carbon dioxide circulation, natural gas conversion, hydrogen:carbon monoxide ratio, energy efficiency.

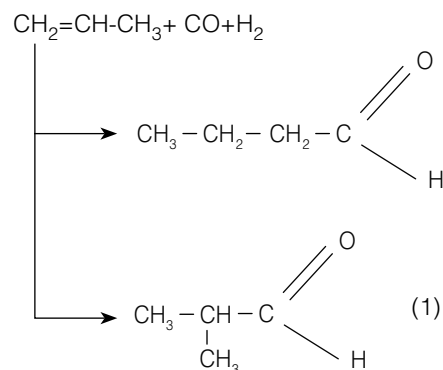
For citation: Maslennikova M.V., Sosna M.KH., Eliseev O.L., Shavrina E.A. IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF BUTYL ALCOHOL PRODUCTION BY HYDROFORMYLATION. Oil & Gas Chemistry. 2020, no. 2, pp. 13–17.

DOI:10.24411/2310-8266-2020-10203

В настоящее время производство бутиловых спиртов в России превышает 280 тыс. т в год. На основе бутиловых спиртов производится широкий ряд продуктов, среди них лакокрасочные покрытия, растворители, пластификаторы, фармацевтические препараты, синтетические смазочные масла, добавки к топливам.

Бутиловый и изобутиловый спирты получают в основном гидрированием бутиральдегидов, которые образуются при гидроформилировании пропилена. В связи с широким применением этих спиртов существует тенденция к повышению их производства при технологических усовершенствованиях.

Гидроформилированием (оксосинтезом) называют превращение олефинов в альдегиды под действием окиси углерода и водорода в присутствии катализаторов. Целевыми продуктами реакции являются обычно линейные альдегиды, хотя наряду с ними образуются также изомеры. Так, при взаимодействии пропилена и синтез-газа получают масляный (н-бутаналь) и изомасляный альдегиды. Их последующее гидрирование дает линейный и изобутиловый спирты:



Промышленными катализаторами оксосинтеза являются карбонильные комплексы кобальта и родия. Большинство процессов с кобальтовыми катализаторами используют в качестве активного компонента гидрокар-

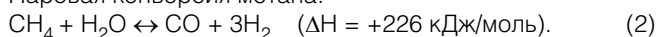
бонил кобальта $\text{HCo}(\text{CO})_4$. Условия реакции с ним довольно жесткие: температура 130–200 °С и давление 20–35 МПа.

Родиевые катализаторы общей формулы $\text{HRh}(\text{CO})(\text{PR}_3)_3$, где R – алкильный или арильный остаток, более активны и позволяют проводить реакцию при температуре 90–130 °С и давлении 1–5 МПа. Несмотря на гораздо более высокую стоимость родиевых катализаторов, они постепенно вытесняют кобальтовые в процессах гидроформилирования легких олефинов благодаря большей активности, селективности по целевым линейным альдегидам и мягким условиям реакции. Доля процессов оксосинтеза с родиевыми катализаторами в настоящее время превышает 70% и продолжает расти. В России, однако, в промышленности до сих пор используются исключительно кобальтовые системы.

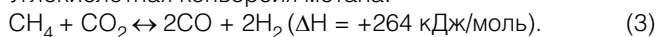
В качестве сырья процесса оксосинтеза выступают олефин и синтез-газ. Наиболее распространенным методом производства синтез-газа из газового сырья является метод паровой конверсии по реакции (2). Однако он обладает серьезными недостатками: значительная эндотермичность процесса, необходимость низких объемных скоростей, высокое соотношение H_2/CO в получаемом синтез-газе.

Для осуществления оксосинтеза требуется синтез-газ с соотношением H_2/CO , равным 1/1, поэтому для его получения используется пароуглекислотная конверсия метана. Ниже приведены уравнения реакций, протекающих в процессе пароуглекислотной конверсии.

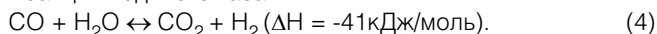
Паровая конверсия метана:



Углекислотная конверсия метана:



Реакция водяного газа:



При проведении пароуглекислотной конверсии комбинируют реакции (2) и (3), подбирая соотношение $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ в исходной смеси так, чтобы получаемое соотношение H_2/CO было максимально близко к требуемому 1/1.

Отложение кокса на катализаторе значительно снижает его активность и стабильность, увеличивает гидравлическое сопротивление системы и может привести к деструкции катализатора. Снижение коксообразования возможно за счет увеличения расхода водяного пара или оксида углерода [1].

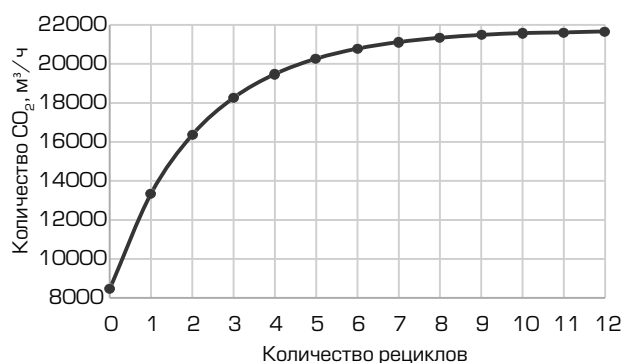
Равновесный состав конвертированного газа зависит от температуры, давления процесса и состава исходной смеси. Основные реакции пароуглекислотной конверсии углеводородов являются эндотермическими, поэтому конверсию проводят при высоких температурах 800–1000 °С. Так как в процессе конверсии происходит увеличение объема, снижение давления способствует увеличению количества синтез-газа. Однако применение повышенного давления (2–5 МПа) имеет определенные преимущества в тех случаях, когда получаемый водород или синтез-газ используют для синтезов под давлением. При этом снижаются затраты энергии на сжатие газа, уменьшается объем аппаратов и трубопроводов, увеличивается скорость процесса и его интенсивность [2].

Для осуществлении процесса пароуглекислотной конверсии возможно использовать два источника диоксида углерода: со стороны и рециркуляционный диоксид углерода.

Рециркуляционный CO_2 позволяет перевести весь диоксид углерода, образовавшийся в процессе пароуглекислотной конверсии, в оксид углерода по обратной реакции (4).

Рис. 1

Зависимость содержания CO_2 в конвертированном газе от количества рециклов



При осуществлении процесса паровой конверсии получаемый конвертированный газ имеет соотношение $\text{H}_2/\text{CO} = 6,3$. Для получения величины согласно стехиометрии реакции (2) $\text{H}_2/\text{CO} = 3$ необходимо весь диоксид углерода, образовавшийся в процессе паровой конверсии, перевести в CO . Для этого образовавшийся CO_2 возвращается на стадию конверсии для осуществления пароуглекислотной конверсии (2–4).

Заметим, что доля CO после проведения процесса пароуглекислотной конверсии увеличивается по сравнению со значением при паровой конверсии до соотношения $\text{H}_2/\text{CO} = 4,43$.

При последовательном осуществлении циркуляции диоксида углерода достигается равенство объемов извлекаемого из конвертированного газа и возвращаемого в процесс пароуглекислотной конверсии CO_2 (рис. 1), тогда соотношение $\text{H}_2/\text{CO} = 3$. Для уменьшения этого соотношения до требуемого $\text{H}_2/\text{CO} = 1$ используются полимерные мембраны.

Мембранное разделение для получения синтез-газа используется при проведении оксосинтеза при высоком давлении (20–30 МПа). За счет сжатия газа перед мембранами создается высокий перепад давления, тем самым повышается эффективность выделения компонентов и снижаются затраты энергии на компримирование газа в процессе его дальнейшей переработки.

В настоящее время прогрессивным усовершенствованием процесса гидроформилирования является снижение давления синтеза до 2–3 МПа. При проведении процесса гидроформилирования под таким давлением сжатие газа с последующим выделением водорода на мембранах нецелесообразно, так как для разделения смеси газов в этом случае потребуется использовать мембраны с высокой поверхностью, чтобы компенсировать низкий перепад давлений. Поэтому были проработаны другие методы получения синтез-газа требуемого состава, например привлечение CO_2 со стороны.

Синтез-газ для процессов при высоком давлении

При использовании в качестве катализатора гидрокарбонила кобальта оптимальными условиями проведения реакции являются: температура 100–200 °С, давление 20–30 МПа. Такая температура обеспечивает генерацию комплексных соединений, а высокое давление – стабилизацию каталитически активных соединений карбонила кобальта.

Так как в присутствии кобальтового катализатора оксосинтез ведется при высоких давлениях, для получения синтез-газа возможно применять пароуглекислотную конверсию в трубчатых печах с рециклом образующегося CO_2 . Для обеспечения оптимального соотношения водорода и монооксида углерода ($\text{H}_2/\text{CO} = 1/1$) проводят процесс мембранного разделения. В данном случае процесс ведется без привлечения CO_2 со стороны.

Конверсия протекает под давлением 3 МПа в трубчатой печи, реакционные трубы которой заполнены никелевым катализатором; подвод тепла осуществляется через стенки реакционных труб за счет сжигания топочного газа. Зачастую применяются никелевые катализаторы, содержащие 24–26% NiO, 55–59% Al_2O_3 , 14–16% CaO [3].

Сернистые соединения, находящиеся в природном газе, отравляют никелевые катализаторы из-за образования неактивных сульфидов никеля. Поэтому природный газ, поступающий на конверсию, должен содержать не более 0,5 мг/м³ соединений серы. Для достижения такой концентрации проводят тонкую очистку от серосодержащих соединений путем гидрирования до сероводорода на алюмокобальтмолибденовых катализаторах с последующей его адсорбцией цинкмедным поглотителем.

Для очистки конвертированного газа от диоксида углерода используют метод хемосорбции 35–50% раствором активированного метилдиэтанолamina (амДЭА). После регенерации раствора амДЭА выделившийся CO_2 возвращается на стадию конверсии.

Мембранное разделение компонентов газа основано на их различной способности перемещаться через полупроницаемую перегородку, разделяющую аппарат на две области. Легкопроницающие компоненты (водород и влага) проходят в область за мембраной, труднопроницающие (метан и окись углерода) вследствие прохождения через мембрану с гораздо меньшей скоростью выводятся из разделительного аппарата [4].

Проникновение вещества через мембраны происходит под действием движущей силы процесса – разности давлений по обе стороны мембраны. Таким образом, для увеличения эффективности разделения необходимо повышать давление смеси с помощью компримирования, что требует дополнительных энергозатрат. Однако использование мембран позволяет добиться высокой степени разделения газов, мембранные установки имеют небольшие размеры, процесс является непрерывным. С помощью мембран происходит разделение газовой смеси на водород и синтез-газ с соотношением основных компонентов 1/1 [5].

Синтез-газ для процессов при низком давлении

С развитием процесса появилась возможность проводить оксосинтез при более низком давлении. В промышленности нашли широкое применение в качестве катализаторов гидридокарбонильные комплексы родия типа $\text{HRh}(\text{CO})(\text{L})_3$, где L = трифенилфосфин или другой органофосфиновый лиганд. Они устойчивы при низком давлении CO и весьма активны даже при невысокой температуре. Процесс гидроформилирования на родиевых катализаторах ведется при температуре 90–130 °C и давлении 1–5 МПа [6].

Так как на родиевом катализаторе процесс проводится при низком давлении, синтез-газ для него с соотношением $\text{H}_2/\text{CO} = 1/1$ получают не за счет использования мембранного блока, а путем привлечения CO_2 со стороны. Кроме того, происходит рециркуляция образовавшейся углекислоты. Конверсию возможно осуществлять как в трубчатой печи, так и с использованием газовых конверторов «Тандем» [7].

Процесс «Тандем» основан на комбинировании паровой, углекислотной и кислородной конверсий. За счет этого снижаются энергозатраты, повышается эффективность использования сырья и высокопотенциального тепла по сравнению с конверсией в трубчатых печах; полученный синтез-газ имеет более низкое соотношение H_2/CO .

«Тандем» является одним из видов автотермической конверсии. Однако в случае процесса «Тандем» тепло конвертированного газа, выходящего из шахтного реактора, расходуется на проведение эндотермической реакции пароуглекислотной конверсии, которая протекает в реакционных трубах трубчатого конвертора [7]. Состав конвертированного газа определяется параметрами работы шахтного доконвертора.

Низкое соотношение H_2/CO достигается за счет высокой температуры конвертированного газа после шахтного доконвертора, так как это способствует смещению равновесия эндотермических реакций, проходящих в трубчатом конверторе, в частности реакции водяного сдвига (4), в сторону образования CO. Кроме того, достигается более высокая степень конверсии метана в сравнении с трубчатой конверсией («Тандем» – 96% против 90% в трубчатой печи). Высокие температуры в трубчатом конверторе являются следствием передачи тепла от горячего потока конвертированного газа, выходящего из шахтного реактора с температурой 900–950 °C.

В качестве окислителя используется технический кислород (~95% O_2), расход которого зависит от температуры исходной парогазовой смеси, степени превращения метана, давления и избытка водяного пара. Для поддержания автотермичности процесса количество кислорода берут из соотношения 0,45–0,5 от объема метана, при этом обеспечивается высокая степень конверсии метана.

В процессе «Тандем» задействовано два вида катализаторов: катализаторы эндотермической конверсии в трубчатом конверторе и катализаторы автотермической конверсии в шахтном доконверторе. В трубчатом конверторе для пароуглекислотной конверсии природного газа под давлением не выше 4 МПа обычно применяются катализаторы смешанного типа, содержащие 24–26% NiO, 55–59% Al_2O_3 , 14–16% CaO. В процессе автотермической конверсии в шахтных конверторах наибольшее распространение получили нанесенные никелевые катализаторы.

Кроме вышеперечисленных, «Тандем» имеет следующий ряд преимуществ:

- автотермичность процесса и замкнутый энергетический цикл;
- низкое потребление энергии;
- отсутствие дымовых газов из трубчатого риформера;
- низкий уровень выбросов вредных веществ (NO_x , SO_2 , CO) в атмосферу;
- снижение размеров блока рекуперации тепла по сравнению с паровой конверсией;
- высокая надежность труб, работающих при перепаде давления на стенке не более 1–3 атм [8].

Среди недостатков данного технологического процесса можно выделить необходимость установки капиталоемкого блока разделения воздуха вследствие высокой потребности в кислороде, взрывоопасность, возможность локальных перегревов в шахтном конверторе.

Сравнение методов получения синтез-газа

Ниже в табл. 1, 2 приведены сравнительные данные по расходу сырья и энергетических компонентов при производстве 1000 нм³ синтез-газа с соотношением $\text{H}_2/\text{CO} = 1/1$.

Современная методика оценки эффективности предусматривает использование нижеприведенных энергетических эквивалентов:

- 1) природный газ
1 тыс. м³ = 8,399 Гкал;
- 2) электрическая энергия
1 тыс. кВт·ч. = 2,43 Гкал;
- 3) вода питательных котлов
1 м³ = 0,0287 Гкал;
- 4) пар водяной
1 Гкал = 1,19 Гкал;
- 5) кислород
1 тыс. м³ = 0,966 Гкал;
- 6) водород
1 тыс. м³ = 2,56 Гкал.

В связи с высокой потребностью в бутиловых спиртах и продуктах на их основе необходимо развивать технологии гидроформилирования, осуществляя модернизации схем получения синтез-газа. Снижение давления оксосинтеза за счет применения современных родиевых катализаторов приведет к тому, что установка мембранного блока станет экономически неэффективной. Поэтому для получения синтез-газа с соотношением H₂/CO=1/1 предлагается использование CO₂ со стороны, что позволит отказаться от установки дополнительного оборудования разделения газа. Однако важно отметить, что такое технологическое решение приведет к увеличению затрат на работу циркуляционного компрессора и регенерацию раствора абсорбента из-за больших объемов циркулирующей углекислоты.

Осуществление циркуляции углекислоты для каждого из технологических решений будет эффективно, так как количество окиси углерода в конвертированном газе будет повышаться, стремясь к требуемому.

Выводы

1. Достижения в технологии процесса оксосинтеза, то есть переход с давления 20–30 Мпа на 2,0–2,5 МПа требует существенного изменения в технологии производства синтез-газа с соотношением H₂/CO = 1/1, которое заключается в отказе от использования в технологии стадии мембранного разделения конвертированного газа и, следовательно, исключения из технологической схемы компрессии конвертированного газа.

2. Переход на пониженное давление оксосинтеза делает более энергетически эффективным получение технологического газа методом автотермической пароуглекислотной кислородной конверсии по схеме «Тандем» в сравнении с пароуглекислотной трубчатой конверсией природного газа.

3. Переход с трубчатой конверсии на конверсию по схеме «Тандем» позволяет снизить затраты на природный газ, а также потребление CO₂ со стороны на 30%.

Таблица 1

Сравнение расходных коэффициентов методов конверсии в трубчатой печи и «Тандем» на производство 1000 м³ синтез-газа

Показатель	Трубчатая конверсия (мембраны)	Трубчатая конверсия (CO ₂ со стороны)	«Тандем» (CO ₂ со стороны)
Расход природного газа, м ³	918	530	363,4
- на технологию	528	274	363,4
- на сжигание	390	256	–
Расход CO ₂ со стороны, м ³	–	243,89	176,25
Тепло на регенерацию CO ₂ , Гкал	21,670	69,028	52,744
Мощность, кВт	159,41	131,00	109,36
- компрессора на сжатие перед мембранами	99,34	–	–
- компрессора для циркуляции CO ₂	56,72	102,36	109,36
- дымососной установки	3,35	2,20	–
Кислород технический, м ³	–	–	211,09
Пар перегретый, Гкал	0,719	0,401	0,570
Питательная вода, м ³	2,984	1,355	1,244
Водород в заводскую сеть, м ³	887	–	–

Таблица 2

Энергоемкость производства 1000 м³ синтез-газа, Гкал

Показатель	Трубчатая конверсия (мембраны)	Трубчатая конверсия (CO ₂ со стороны)	«Тандем» (CO ₂ со стороны)
Природный газ	7,711	4,451	3,052
Электрическая энергия	0,387	0,254	0,266
Пар перегретый	–0,856	–0,477	0,678
Питательная вода	0,086	0,039	0,036
Кислород технический	–	–	0,219
Водород в заводскую сеть	–2,271	–	–
Итого	5,057	4,267	4,251

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иткулова Ш.С. Влияние воды на углекислотную конверсию метана на Ni-, Co-, Fe-содержащих биметаллических нанесенных катализаторах // Изв. Нац. акад. наук Респ. Казахстан. Сер. химическая, 2010. № 4 (382). С. 55–57.
- Справочник азотчика. Т. 1 / под ред. Е.Я. Мельникова. М.: Химия, 1967. 492 с.
- Лалидус А.Л., Голубева И.А., Жагфаров Ф.Г. Газохимия: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во РГУ им. И.М. Губкина, 2013. 405 с.
- Сосна М.Х., Хаманова А.А. Расчет мембранной установки выделения водорода из продувочных газов: Метод. указания. М.: Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2018. 21 с.
- Рыбаков В.А., Елькин А.Л., Тюкавин Г.Н. и др. Технология оксосинтеза и родственных процессов с участием окиси углерода. Пермь: Сибур-Химпром, 2004. 229 с.
- Сосна М.Х., Елисеев О.Л., Масленникова М.В., Ходорченко П.П. Оксосинтез: учеб. пособие. М.: Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2020. 46 с.
- Сосна М.Х., Шовкопляс Н.Ю. Охлаждаемые газовые реакторы – опыт десятилетий подтверждает качество // Газохимия. 2011. № 3–4 (19–20). С. 38–40.
- Тандем. ОАО «ГИАП»: [сайт]. URL: <https://www.giap-m.com/designs/tandem> (дата обращения: 21.03.2020)

REFERENCES

- Itkulova SH.S. Effect of water on carbon dioxide conversion of methane on Ni-, Co-, Fe-containing bimetallic supported catalysts. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan*, 2010, no. 4(382), pp. 55–57 (In Russian).
- Spravochnik azotchika* [Reference book of a nitrogen worker]. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 492 p.
- Lapidus A.L., Golubeva I.A., Zhagfarov F.G. *Gazokhimiya* [Gas chemistry]. Moscow, RGU im. I.M. Gubkina Publ., 2013. 405 p.
- Sosna M.KH., Khamanova A.A. *Raschet membrannoy ustanovki vydeleniya vodoroda iz produvochnykh gazov: Metod. ukazaniya* [Calculation of a membrane unit for hydrogen recovery from purge gases: Method directions]. Moscow, RGU нефти i gaza (NIU) im. I.M. Gubkina Publ., 2018. 21p.
- Rybakov V.A., Yel'kin A.L., Tyukavin G.N. *Tekhnologiya oksosinteza i rodstvennykh protsessov s uchastiyem okisi ugleroda* [Technology of oxosynthesis and related processes involving carbon monoxide]. Perm, Sibur-Khimprom Publ., 2004. 229 p.
- Sosna M.KH., Yeliseyev O.L., Maslennikova M.V., Khodorchenko P.P. *Oksosintez* [Oxosynthesis]. Moscow, RGU нефти i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina Publ., 2020. 46 p.
- Sosna M.KH., Shovkoplyas N.YU. Cooled gas reactors - the experience of decades confirms the quality. *Gazokhimiya*, 2011, no. 3–4 (19–20), pp. 38–40 (In Russian).
- Tandem. OAO «GIAП»* (Tandem. JSC GIAP) Available at: <https://www.giap-m.com/designs/tandem> (accessed 21 March 2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Масленникова Мария Витальевна, магистрант кафедры газохимии, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина

Сосна Михаил Хаймович, д.т.н., проф. кафедры газохимии, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

Елисеев Олег Леонидович, д.х.н., доцент кафедры газохимии, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина.

Шаврина Екатерина Алексеевна, студент кафедры газохимии, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина

Marya V. Maslennikova, Master of the Department of Gaschemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

Michael KH. Sosna, Dr. Sci. (Tech.), Prof. of the Department of Gaschemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

Oleg L. Eliseev, Dr. Sci. (Chem.), Assoc. Prof. of the Department of Gaschemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

Ekaterina A. Shavrina, Student of the Department of Gaschemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

