

КОЛЛОИДНЫЕ И НАНОРАЗМЕРНЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ В ОРГАНИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ: XXIII.¹ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЕ АМИНИРОВАНИЕ КАРБОНИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОТОЧНОМ РЕЖИМЕ ПРИ КАТАЛИЗЕ НАНОЧАСТИЦАМИ НИКЕЛЯ

© 2019 г. В. М. Мохов*, Ю. В. Попов, А. Н. Папутина, Д. Н. Небыков, Е. В. Шишкин

Волгоградский государственный технический университет, пр. Ленина 28, Волгоград, 400005 Россия

*e-mail: tons@vstu.ru

Поступило в Редакцию 30 мая 2019 г.

После доработки 30 мая 2019 г.

Принято к печати 6 июня 2019 г.

Восстановительное аминирование альдегидов и кетонов первичными и вторичными аминами при катализе наночастицами никеля, нанесенными на цеолит X, MgO или активированный уголь, в непрерывном проточном режиме в газовой фазе или в системе газ–жидкость протекает при атмосферном давлении водорода с образованием вторичных или третичных аминов с высокими выходами.

Ключевые слова: катализ, наночастицы, никель, гидрирование, восстановительное аминирование, амины

DOI: 10.1134/S0044460X19120011

Вторичные и третичные амины широко используются в качестве полупродуктов для получения фармакологических препаратов, растворителей, полимеров, красителей, а также сельскохозяйственных химикатов [2–5].

Один из широко распространенных методов синтеза аминов – восстановительное аминирование карбонильных соединений [6–8]. К достоинствам данного метода относятся возможность получения широкого ряда аминов с различными алкильными группами (в зависимости от исходных реагентов) и относительная простота процесса. Синтез аминов протекает последовательно, включая стадии конденсации карбонильного соединения с амином с образованием иминов (енаминов) и последующего гидрирования кратных связей C=C или C=N в интермедиатах. Для протекания обеих стадий иногда необходимо значительное время, и

в ряде случаев единственно возможна периодическая организация процесса с использованием автоклава. Непрерывный процесс восстановительного аминирования используется в основном для получения низкомолекулярных первичных аминов из пространственно незагруженных альдегидов и кетонов. Протекание побочных реакций последовательного алкилирования вторичного амина карбонильным соединением до третичного амина, а также гидрирования карбонильного соединения до алканаола снижает селективность процесса.

Восстановительное аминирование альдегидов или кетонов при катализе никелем Ренея проводят в автоклаве при 100–150 атм водорода и 100°C [9]. Реакция между анилином и ацетоном в присутствии водорода при катализе хромитом меди в проточном режиме протекает при 300°C и сопровождается побочными реакциями C-алкилирования анилина [10]. При катализе комплексами родия(I) гомогенное восстановительное аминирование аль-

¹ Сообщение XXII см. [1].

дегидов и кетонов протекает уже при комнатной температуре (давление водорода 50 атм) с образованием смеси соответствующего амина и спирта – продукта восстановления карбонильного соединения [11].

Изучено восстановительное аминирование карбонильных соединений при катализе различными комплексами иридия (30–35°C, 5–60 атм водорода) [12, 13]. Выходы аминов за 12–13 ч реакции достигали количественных.

Реакцию в присутствии меди, осажденной на различные носители, проводили в периодических условиях (5–24 ч, 100–130°C) при интенсивном перемешивании и барботировании водорода (1 атм) [14]. Высокую активность и селективность проявляет медь, нанесенная на двуокись кремния или его комбинации с оксидами алюминия или титана. Использование в качестве носителя оксида алюминия приводит к образованию алканолов с выходом до 75%.

Восстановительное аминирование альдегидов и кетонов проводили при катализе наночастицами оксида кобальта на носителе в квазигомогенных периодических условиях (50 атм водорода, 150°C, 15 ч) [15]. Выходы вторичных или третичных аминов от 10 до 95% в зависимости от субстрата. Катализатор подвергали рециклизации не менее 5 раз без существенной потери активности.

Для катализа реакции восстановительного аминирования карбонильных соединений применяли наночастицы металлов, в частности, палладия и платины, нанесенных на цеолиты или оксид алюминия [16]. Реакцию проводили в реакторе периодического типа (5 атм водорода, 100°C, 7 ч). Исследованные катализаторы проявили более высокую активность, чем коммерческие катализаторы Pt/C или Pd/Al₂O₃.

Только в нескольких работах сообщалось о восстановительном аминировании карбонильных соединений в непрерывном режиме. Производные бензилпиперазина получены из замещенных бензальдегидов и пиперазина в проточном режиме над Pd/C, Pt/C и Pd(OH)₂/C [17–18]. Описано применение нанесенных на оксид титана наночастиц золота (2–3 нм) для катализа реакции алкилирования аминов в проточной циркуляционной установке [19]. В качестве алкилирующих агентов ис-

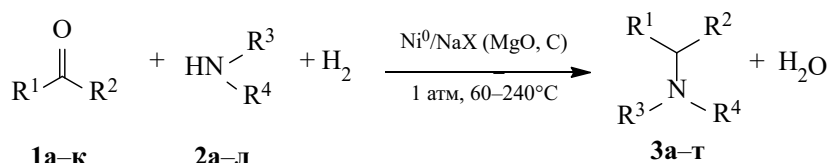
пользовали не карбонильные соединения, а алканола. Реакция протекала при 50 атм температуре 180–200°C в среде толуола в течение 24 ч, выходы аминов достигали 92%. Реакцию между фенетиламином и левулиновой кислотой в проточных условиях при катализе железоникелевым катализатором проводили при 150°C и давлении H₂ 85 атм и получили N-замещенный пирролидон с выходом 91% [20]. Описан непрерывный способ восстановительного аминирования кетонов формиатом аммония при катализе Pd/C [21]. Коммерческий Pd/C использовали для катализа реакции (40–140°C) между аминами и кетонами, которые подавались отдельно в виде 0.1 М. растворов в толуоле, выходы составляли 63–100% [22].

Разработка доступных высокоактивных и селективных гетерогенных катализаторов восстановительного аминирования остается актуальной. Ранее исследовано гидрирование енаминов и иминов при катализе нанесенными на цеолит и активированный уголь наночастицами никеля [23].

Нами исследована возможность проведения реакции восстановительного аминирования альдегидов и кетонов первичными и вторичными аминами в непрерывном режиме при атмосферном давлении водорода, стабильность катализатора в присутствии реакционной воды, закономерности, влияющие на селективность реакции (схема 1). Исходные карбонильные соединения: пропаналь, бутаналь, 2-метилпропаналь, 3-метилбутаналь, гексаналь, гептаналь, бензальдегид, диэтилкетон, циклогексанон, ацетофенон; исходные амины: бутиламин, изобутиламин, *трет*-бутиламин, гексиламин, циклогексиламин, анилин, пирролидин, пиперидин, гексагидроазепин, дибутиламин. Наночастицы никеля осаждали на соответствующую подложку (цеолит NaX, кусковой оксид магния, активированный уголь Norit RX 3 EXTRA) по ранее описанной методике [24, 25], размеры частиц Ni⁰/NaX, Ni⁰/MgO, Ni⁰/C составляли 20–100 нм.

Реакцию проводили в токе 5–15-кратного избытка водорода при атмосферном давлении и температуре 60–240°C в реакторе вытеснения, представляющем собой металлическую трубку с внутренним диаметром 9 мм и высотой зоны нагрева 100 мм, помещенную в электрическую печь. В средней части реактора размещен слой катали-

Схема 1.



$\text{R}^1 = \text{H}$, $\text{R}^2 = \text{Et}$ (**1a**), Pr (**1б**), $i\text{-Pr}$ (**1в**), $i\text{-Bu}$ (**1г**), $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5$ (**1д**), $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6$ (**1е**), Ph (**1ж**); $\text{R}^1 = \text{Me}$, $\text{R}^2 = \text{Ph}$ (**1з**), $\text{R}^1 = \text{R}^2 = \text{Et}$ (**1и**), $\text{R}^1\text{-R}^2 = (\text{CH}_2)_5$ (**1к**); $\text{R}^3 = \text{H}$, $\text{R}^4 = \text{Bu}$ (**2а**), $i\text{-Bu}$ (**2б**), $t\text{-Bu}$ (**2в**), $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5$ (**2г**), Cy (**2д**), Ph (**2е**), PhCH_2 (**2ж**); $\text{R}^3 = \text{R}^4 = \text{Bu}$ (**2з**); $\text{R}^3\text{-R}^4 = (\text{CH}_2)_4$ (**2и**), $(\text{CH}_2)_5$ (**2к**), $(\text{CH}_2)_6$ (**2л**); $\text{R}^1 = \text{R}^3 = \text{H}$, $\text{R}^2 = i\text{-Pr}$, $\text{R}^4 = i\text{-Bu}$ (**3а**), $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5$ (**3б**); $\text{R}^1 = \text{R}^3 = \text{H}$, $\text{R}^4 = \text{Ph}$, $\text{R}^2 = \text{Et}$ (**3в**), $i\text{-Pr}$ (**3г**), $i\text{-Bu}$ (**3д**); $\text{R}^1 = \text{R}^3 = \text{H}$, $\text{R}^2 = i\text{-Pr}$, $\text{R}^4 = \text{Cy}$ (**3е**); $\text{R}^1 = \text{R}^3 = \text{H}$, $\text{R}^2 = \text{Ph}$, $\text{R}^4 = \text{Bu}$ (**3ж**); $\text{R}^1 = \text{H}$, $\text{R}^2 = \text{CH}_3(\text{CH}_2)_6$, $\text{R}^3 = \text{R}^4 = \text{Bu}$ (**3з**), $\text{R}^2 = i\text{-Pr}$, $\text{R}^3\text{-R}^4 = (\text{CH}_2)_4$ (**3и**), $\text{R}^2 = \text{Pr}$, $\text{R}^3\text{-R}^4 = (\text{CH}_2)_6$ (**3к**), $\text{R}^2 = \text{CH}_3(\text{CH}_2)_5$, $\text{R}^3\text{-R}^4 = (\text{CH}_2)_6$ (**3л**); $\text{R}^1\text{-R}^2 = (\text{CH}_2)_5$, $\text{R}^3 = \text{H}$, $\text{R}^4 = \text{Bu}$ (**3м**), $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5$ (**3н**), Ph (**3о**); $\text{R}^1\text{-R}^2 = \text{Et}$, $\text{R}^3\text{-R}^4 = (\text{CH}_2)_5$ (**3п**); $\text{R}^1\text{-R}^2 = (\text{CH}_2)_5$, $\text{R}^3\text{-R}^4 = (\text{CH}_2)_5$ (**3р**); $\text{R}^1 = \text{Me}$, $\text{R}^2 = \text{Ph}$, $\text{R}^3 = \text{H}$, $\text{R}^4 = i\text{-Bu}$ (**3с**), $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5$ (**3т**).

затора, до и после которого находится инертный наполнитель (кварцевая насадка).

Исходные соединения **1а–к** и **2а–л** подавали в реактор непрерывно отдельными потоками без растворителя одновременно с водородом (1 атм). Состав катализата определяли методом хромато-масс-спектрометрии. Большую часть продуктов реакции идентифицировали по совпадению их масс-спектров с базой данных прибора, остальные соединения идентифицировали по молекулярным ионам и характеристическому распаду.

На катализаторе Ni^0/NaX при удельном расходе карбонильных соединений и аминов 0.9–1.8 л/(кг_{кат}·ч), мольном соотношении соединений **1а–к** и **2а–л** (1–1.5):(1–3) и 5–15-кратном избытке водорода при 60–240°C выходы аминов **3а–т** в зависимости от строения исходных реагентов составляли 37–97%. При получении аминов **3г**, **н**, **о** в составе катализата обнаружены промежуточные продукты реакции – имины и енамины. При увеличении избытка водорода или при повышении температуры реакции интермедиаты отсутствовали в составе катализата.

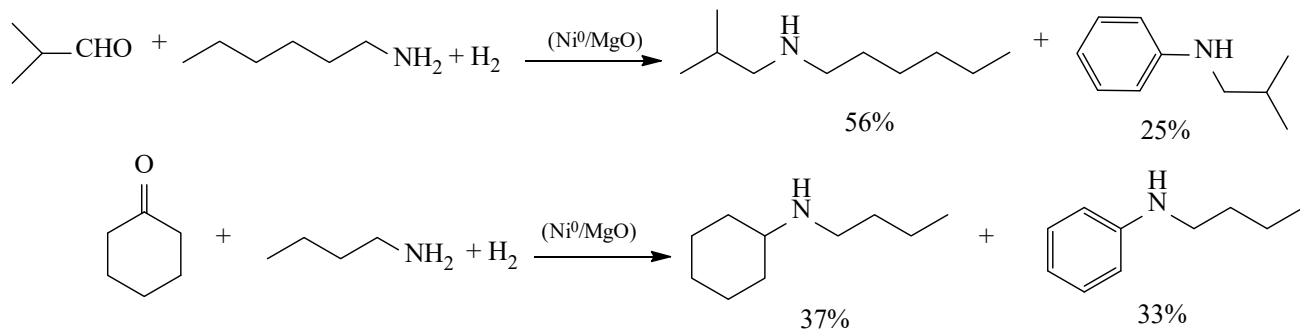
При использовании катализатора Ni^0/NaX в катализате практически полностью отсутствовали продукты гидрирования альдегидов и кетонов **1а–к** – соответствующие алканола. Их максимальная доля в составе катализата при температуре проведения реакции ниже 180°C не превышала 1.5–2%. Дополнительными исследованиями установлено, что в отсутствие амина в аналогичных условиях циклогексанон подвергается гидрированию в циклогексанол только на 2%, в то время

как коллоидный никелевый катализатор гидрирует алифатические кетоны в жидкой фазе в течение 10–12 ч [24]. Таким образом, Ni^0/NaX – селективный катализатор восстановительного аминирования карбонильных соединений, и его применение позволяет избежать протекания побочной реакции их гидрирования.

Поскольку взаимодействие алифатических альдегидов с первичными и некоторыми вторичными аминами протекает без применения катализаторов, была также изучена возможность проведения синтеза при подаче в реактор смеси карбонильных соединений с аминами в виде равновесной смеси с имидами (енамидами) и водой. В этом случае выходы и селективность реакций отличаются незначительно от соответствующих показателей при отдельной подаче реагентов.

При большом избытке первичных аминов **2а**, **б**, **г**, **д**, **ж** протекает параллельная реакция их диспропорционирования, приводящая к получению симметричных диалкиламинов. Эта реакция на данном типе катализаторов была исследована ранее [26]. В частности, при восстановительном аминировании циклогексанона **1к** бутиламином **2а** при мольном соотношении реагентов 1:3 наряду с *N*-бутилциклогексанамином образуется дибутиламин (12 мас% в катализате, конверсия амина **2а** 95%, селективность по дибутилмину 14%). Использование вторичных аминов (морфолин, пиперидин и др.), не способных к диспропорционированию, позволяет проводить реакцию при их значительном (3–5-кратном) избытке до полной конверсии карбонильного соединения при 120–160°C.

Схема 2.



Для получения аминов **3б–г, л** использовали избыток карбонильного соединения по отношению к амину. При восстановительном аминировании пропаналь **1а**, взятого в избытке, анилином **2е** наряду с вторичным амином **3в** образуется третичный амин – *N,N*-дипропиламин – с выходом 28%. Реакция анилина **2е** с 2-метилпропаналем **1в** при избытке последнего протекает селективно, и доля соответствующего третичного амина в катализате составляет лишь 3 мас%

Повышение температуры выше 200°C приводит к восстановлению 5–10% неконвертированных карбонильных соединений до алканолов. При эквимолярном соотношении амина и карбонильного соединения и снижении температуры до 160–180°C побочные реакции отсутствовали, однако степень конверсии в большинстве случаев составляла 60–80%, и для ее повышения требуется температура реакции выше 200°C или снижение удельного расхода реагентов.

Восстановительное аминирование алифатических альдегидов пространственно незагруженными аминами протекает легко уже при температурах ниже 100°C. Реакция гексаналя **1д** с гексагидроазепином **2л** при 60°C на катализаторе Ni⁰/NaX приводит к полной конверсии исходных веществ и практически количественному выходу соединения **3л** даже при эквимолярном соотношении реагентов **1д** и **2л**. При проведении реакции при 20 и 40°C выходы вторичного амина **3л** достигают 70–80%, а конверсия исходных веществ – 80–90%. При 20°C наряду с соединением **3л** обнаружен промежуточный енамин (3.5%). Аналогичные результаты получены и для реакций альдегидов C₄–C₇ с циклическими вторичными аминами.

Столь высокие выходы продуктов восстановительного аминирования в мягких условиях и малая их зависимость от температуры объясняются не только высокой активностью катализатора, но и увеличением времени контакта жидких реагентов с катализатором.

Влияние подложки в реакции восстановительного аминирования на каталитическую активность частиц никеля несущественно, а на селективность реакции – значительно. Применение катализатора Ni⁰/MgO в реакции восстановительного аминирования 2-метилпропаналь **1в** гексаминном **2г** с катализатором Ni⁰/MgO наряду с вторичным амином **3в** образуется *N*-изобутиланилин (выход 25%) – продукт дегидроароматизации гексильной группы (схема 2). Аналогично, при взаимодействии циклогексанона **1к** с бутиламином **2а** побочно образуется *N*-бутиланилин с выходом 33%.

На катализаторах Ni⁰/MgO и Ni⁰/C побочная реакция восстановления карбонильных соединений в алканола протекает при более низких температурах, чем на катализаторе Ni⁰/NaX, что приводит к снижению селективности реакции восстановительного аминирования. Катализатор Ni⁰/C показал лучшие результаты при восстановительном аминировании 2-метилпропаналь **1в** *трет*-бутиламином **2в**. *N*-трет-Бутилизобутиламин **3а** получен с выходом 48%, в то время как при катализе Ni⁰/NaX был получен лишь промежуточный имин. Катализатор Ni⁰/C более эффективен при восстановительном аминировании кетонов вторичными аминами при 120°C. Выход *N*-циклогексилпиперидина **3р** при взаимодействии циклогексанона **1л** с пиперидином **2к** составил 73% по сравнению с 57%-ным выходом

на катализаторе Ni⁰/NaX в аналогичных условиях. Катализатор Ni⁰/C способен работать и при меньших температурах. Выход амина **3p** при 80°C составил 64%, при 60°C – 36%.

Таким образом, применение гетерогенного катализатора Ni⁰/NaX, а также Ni⁰/MgO и Ni⁰/C в реакциях восстановительного аминирования карбонильных соединений позволяет получать вторичные и третичные амины с выходами 37–97% и селективностью 49–100% при температурах 60–240°C и атмосферном давлении водорода в проточном режиме, при этом реакционная вода не влияет на активность и стабильность работы катализаторов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Хромато-масс-спектральный анализ выполнен на приборе Saturn 2100 T/GC3900 (ЭУ, 70 эВ).

Приготовление катализатора. Катализатор получали пропиткой твердого носителя (цеолит NaX, оксид магния MgO, активированный уголь Norit RX 3 EXTRA) водным раствором гексагидрата хлорида никеля(II) NiCl₂·6H₂O в течение 5–6 ч. После фильтрования и промывания дистиллированной водой композит обрабатывали раствором тетрагидробората натрия NaBH₄ в воде при 20–25°C в течение 20–30 мин. Получали катализатор с размерами частиц никеля на поверхности носителя 70–100 нм [23]. Восстановленный катализатор загружали в реактор во влажном виде и осушали от воды в токе водорода при 120–300°C непосредственно перед реакцией.

Реакция восстановительного аминирования (общая методика). Реакцию проводили в реакторе вытеснения при атмосферном давлении и температуре 60–240°C. В этом температурном интервале реакция может осуществляться как в газовой фазе, так и в системе газ–жидкость–твердый катализатор в зависимости от температур кипения исходных веществ. Лабораторный реактор представляет собой трубку из стали 12X18H10T с внутренним диаметром 9 мм и высотой зоны нагрева 50 мм, помещенный в электрическую печь. В средней части реактора размещен слой катализатора, до и после которого находится инертный наполнитель (кварцевая насадка). При различных температурах дозируют жидкие альдегид (кетон) и амин в

заданном соотношении и устанавливают необходимый расход водорода. Удельная скорость подачи жидкой смеси 0.9–1.8 л/(кг_{кат}·ч). Расход водорода 250–1500 л/(кг_{кат}·ч) (5–15-кратный мольный избыток).

N-трет-Бутил-2-метилпропан-1-амин (3a). На катализатор Ni⁰/C массой 2 г при 160°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь 2-метилпропаналь **1в** и трет-бутиламина **2в** с расходом 1.8 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1в:2в** = 1:2). Конверсия альдегида **1в** 48%. Селективность по продукту реакции **3a** 100%, выход 48%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн}, %): 130.8 (8.8) [*M* + 2]⁺, 129.8 (100) [*M* + 1]⁺, 128.0 (4.2) [*M* – 1]⁺, 115.0 (8.5), 114.0 (95.0), 85.8 (2.8), 58.0 (26.2), 57.0 (6.7), 56.0 (2.6), 54.9 (2.0), 42.0 (6.4), 41.0 (8.5).

N-Изобутилгексан-1-амин (3б). а. На катализатор Ni⁰/NaX массой 4 г при 180°C подавали водород с расходом 750 л/(кг_{кат}·ч), 2-метилпропаналь **1в** с расходом 1.08 л/(кг_{кат}·ч) и гексан-1-амин **2г** с расходом 0.72 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1в:2г** = 1.5:1). Конверсия амина **2г** 100%, селективность по продукту реакции **3б** 55.8%, выход 55.8%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн}, %): 157.0 (9.8) [*M*]⁺, 156.0 (100) [*M* – 1]⁺, 154.1 (5.6), 112.9 (6.5), 112.0 (91.9), 83.0 (3.2), 70.0 (6.5), 68.0 (3.6), 57.0 (2.5), 56.0 (14.4), 54.9 (10.2), 53.0 (2.2), 43.9 (2.2), 43.0 (2.6), 42.0 (2.5), 41.0 (10.1). **N-Гексил-2-метилпропан-1-имин**, выход 12.9%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн}, %): 157.0 (11) [*M* + 2]⁺, 156.0 (100) [*M* + 1]⁺, 154.2 (4) [*M* – 1]⁺, 112.1 (46), 84.2 (2), 70.0 (2), 56.0 (5), 55 (11), 43 (6), 42 (4), 41 (8). **Дигексиламин**, выход 22.3%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн}, %): 187.1 (8) [*M* + 2]⁺, 186.1 (50) [*M* + 1]⁺, 184.8 (4) [*M*]⁺, 114.0 (60), 44.0 (100). **N-Гексилгексан-1-имин**, выход 7.3%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн}, %): 185.1 (13) [*M* + 2]⁺, 184.1 (100) [*M* + 1]⁺, 182.2 (3) [*M* – 1]⁺, 112.0 (37), 41.0 (4).

б. На катализатор Ni⁰/MgO массой 4 г при 200°C подавали водород с расходом 1000 л/(кг_{кат}·ч) и смесь 2-метилпропаналь **1в** с расходом 1.08 л/(кг_{кат}·ч) и гексан-1-амин **2г** с расходом 0.72 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1в:2г** = 1.5:1). Конверсия амина **2г** 100%, селективность по продукту реакции **3б** 56.3%, выход 56.3%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн}, %): 157.0 (9.8) [*M*]⁺, 156.0 (100) [*M* – 1]⁺, 154.1 (5.6), 112.9 (6.5), 112.0 (91.9), 83.0

(3.2), 70.0 (6.5), 68.0 (3.6), 57.0 (2.5), 56.0 (14.4), 54.9 (10.2), 53.0 (2.2), 43.9 (2.2), 43.0 (2.6), 42.0 (2.5), 41.0 (10.1). **N-Изобутилгексан-1-имин**. Выход 19.7%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 156.0 (3.7) $[M + 1]^+$, 154.1 (1.2) $[M - 1]^+$, 144.4 (16.9), 142.8 (10.9), 112.0 (16.1), 100.8 (2.9), 74.0 (5.7), 72.9 (100), 70.8 (15.9), 57.0 (4.4), 56.0 (7.3), 54.9 (49.3), 45.0 (3.8), 43.0 (19.5), 41.0 (17.8). **N-Изобутиланилин**, выход 24.9%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 150.9 (10.4) $[M + 2]^+$, 150.0 (100) $[M + 1]^+$, 149.0 (48.5) $[M]^+$, 148.1 (4.6) $[M - 1]$, 107.1 (5.6), 106.2 (64.2), 79.1 (3.1), 77.0 (3.0).

N-Пропиланилин (3в). На катализатор Ni^0/NaX массой 2 г при 200°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь пропаналя **1а** и анилина **2е** (мольное соотношение реагентов **1а:2е** = 1:1.5) с расходом 1.8 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия альдегида **1а** 99%, селективность по продукту реакции **3в** 57%, выход 56.4%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 136.9 (3.5) $[M + 2]^+$, 136.0 (39.7) $[M + 1]^+$, 134.8 (41.4) $[M]^+$, 106.9 (7.5), 105.9 (100), 104.0 (4.1), 79.0 (14.1), 77.0 (19.1), 65.0 (3.6), 50.9 (9.4), 50.0 (6.1), 43.9 (1.4). **N,N-Дипропиланилин**, выход 42.5%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 178.9 (12.3) $[M + 2]^+$, 177.9 (100) $[M + 1]^+$, 177.2 (36.6) $[M]^+$, 176.2 (5.0) $[M - 1]^+$, 107.0 (3.2), 106.1 (38.9), 104.0 (1.2), 77.0 (1.2).

N-Изобутиланилин (3г). а. На катализатор Ni^0/NaX массой 2 г при 200°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч), 2-метилпропаналь **1в** с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч) и анилин **2е** с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1в:2е** = 1:1). Конверсия альдегида **1в** 95.7%, селективность по амину **3е** 100%, выход 95.7%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 150.9 (5) $[M + 2]^+$, 150.0 (41) $[M + 1]^+$, 149.0 (34) $[M]^+$, 107.0 (8), 106.0 (100), 77.0 (11), 51.0 (6).

б. На катализатор Ni^0/NaX массой 2 г при 180°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь 2-метилпропаналя **1в** и анилина **2е** (мольное соотношение реагентов **1в** и **2е** = 1:1.5) с расходом 1.8 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия альдегида **1в** 89.3%, селективность по амину **3г** 100%, выход 89.3%.

N-Изопентиланилин (3д). На катализатор Ni^0/NaX массой 4 г при 160°C подавали водород с расходом 500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь 3-метилбутаналя **1г** и анилина **2е** (мольное соотношение реагентов

1г:2е = 1:1) с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия альдегида **1г** 89.7%, селективность по амину **3д** 100%, выход 89.7%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 164.8 (1.2) $[M + 2]^+$, 163.9 (13.2) $[M + 1]^+$, 163.0 (25.3) $[M]^+$, 107.0 (7.2), 105.9 (100), 93.0 (4.1), 79.1 (9.8), 78.1 (3), 77.0 (13.2), 65.0 (3.4), 51.0 (5.8), 50.0 (3.4), 41.0 (3.5).

N-Изобутилциклогексанами́н (3е). а. На катализатор Ni^0/NaX массой 2 г при 180°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь 2-метилпропаналя **1в** и циклогексиламина **2д** (мольное соотношение реагентов **1в:2д** = 1:1.5) с расходом 1.8 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия альдегида **1в** 99%, селективность по амину **3е** 88.3%, выход 87.4%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 156.9 (6) $[M + 2]^+$, 156.0 (54.5) $[M + 1]^+$, 154.1 (4) $[M - 1]^+$, 112.0 (100), 84.0 (13.6), 70.0 (14.5), 56.0 (13), 43.0 (18.5), 41.0 (21).

б. На катализатор Ni^0/MgO массой 4 г при 200°C подавали водород с расходом 500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь циклогексанона **1к** и изобутиламина **2б** (мольное соотношение реагентов **1к:2б** = 1:3) с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия кетона **1к** 88%, селективность по амину **3е** 100%, выход 88%.

N-Бензилбутан-1-амин (3ж). На катализатор Ni^0/NaX массой 2 г подавали водород с расходом 1000 л/(кг_{кат}·ч). Одновременно с водородом точно с ним при 200°C подавали бензальдегид **1ж** с расходом 0.45 л/(кг_{кат}·ч) и 1-бутиламин **2а** с расходом 1.35 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1ж:2а** = 1:3). Конверсия альдегида **1ж** 96.5%, селективность по амину **3ж** 88.1%, выход 85%. Масс-спектр, m/e ($I_{\text{отн}}$, %): 163.9 (9.4) $[M + 1]^+$, 162.0 (3) $[M - 1]^+$, 119.9 (44.4), 105.9 (11), 91.0 (100), 77.0 (3), 65.0 (11), 51 (3), 41 (3). **N-Бутилбензилиденамин**, выход 4.9%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 163.0 (5.7) $[M + 2]^+$, 162.0 (40) $[M + 1]^+$, 160.9 (9) $[M]^+$, 160.0 (29) $[M - 1]^+$, 132.0 (32), 119.0 (13), 118.0 (88), 117.0 (10.4), 105.0 (11), 104.0 (28), 91.0 (100), 89.1 (13), 77.0 (12.3), 65.1 (13), 51 (12.6), 50.0 (10), 41 (9). **N,N-Дибутылбензиламин**, выход 6.5%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 221.2 (2) $[M + 2]^+$, 220.1 (11.6) $[M + 1]^+$, 219.1 (3) $[M]^+$, 218.1 (13.7) $[M - 1]^+$, 177.0 (12), 176.0 (100), 142.1 (2), 134.1 (22), 91.1 (15), 65.0 (2), 41 (2).

N,N-Дибутылгептан-1-амин (3з). На катализатор Ni^0/NaX массой 4 г при 180°C подавали

водород с расходом 250 л/(кг_{кат}·ч) и смесь гепталаля **1е** и дибутиламина **2з** (мольное соотношение реагентов **1е:2з** = 1:2) с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия альдегида **1е** 100%, селективность по амину **3з** 80.9%, выход 80.9%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 229.1 (6.1) [$M + 2$]⁺, 228.2 (40.2) [$M + 1$]⁺, 226.2 (11.8) [$M - 1$]⁺, 185.1 (12.5), 184.2 (100), 183.2 (10.2), 143.2 (6.1), 144.2 (66.3), 140.2 (4.4), 101.1 (4.2), 100.0 (64.2), 98.2 (8.4), 58.1 (62.2), 57.2 (3.9).

N-Изобутилпирролидин (3и). На катализатор Ni⁰/NaX массой 2 г при 140°C подавали водород с расходом 500 л/(кг_{кат}·ч), 2-метилпропаналь **1в** с расходом 0.72 л/(кг_{кат}·ч) и пирролидин **2и** с расходом 1.08 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1в:2и** = 1:1.5). Конверсия альдегида **1в** 90.6%, селективность по продукту реакции **3и** 100%, выход 90.6%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 129.0 (3) [$M + 2$]⁺, 128.0 (37.6) [$M + 1$]⁺, 126.0 (11) [$M - 1$]⁺, 112.0 (1), 84.9 (5), 84.0 (100), 83.0 (8).

N-Бутилгексагидроазепин (3к). На катализатор Ni⁰/NaX массой 2 г при 180°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь бутанала **1б** и гексагидроазепина **2л** (мольное соотношение реагентов **1б:2л** = 1.5:1) с расходом 1.8 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия гексагидроазепина **2л** 93.8%, селективность по продукту реакции **3к** 100%, выход 93.8%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 157.0 (5) [$M + 2$]⁺, 156.0 (550) [$M + 1$]⁺, 154.2 (14.6) [$M - 1$]⁺, 113.1 (9), 112.3 (100), 111.3 (17), 98.0 (1.5), 58.0 (45), 57.2 (5).

N-Гексилгексагидроазепин (3л). На катализатор Ni⁰/NaX массой 4 г при 60°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч), гексаналь **1д** с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч) и гексагидроазепин **2л** с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1д:2л** = 1:1). Конверсия гексагидроазепина **2л** 84.4%, селективность по продукту реакции **3л** 100%, выход 84.4%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 185.1 (1.6) [$M + 2$]⁺, 184.1 (10.7) [$M + 1$]⁺, 182.1 (3.8) [$M - 1$]⁺, 113.0 (7.3), 112.0 (100), 84.1 (2.6), 58.2 (31.8), 44.2 (2.2), 42.0 (2.4).

N-Бутилциклогексанамина (3м). а. На катализатор Ni⁰/MgO массой 4 г при 240°C подавали водород с расходом 1000 л/(кг_{кат}·ч), циклогексанон **1к** с расходом 0.72 л/(кг_{кат}·ч) и бутиламин **2а** с расходом 1.08 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1к:2а** = 1:1.5). Конверсия циклогексанона **1к** 76.3%, селективность по продукту реакции

3м 48.8%, выход 37.3%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 157.1 (5.6) [$M + 2$]⁺, 156.0 (43.3) [$M + 1$]⁺, 154.8 (4.6) [M]⁺, 154.2 (3.3) [$M - 1$], 126.0 (3.9), 112.9 (10.1), 112.0 (100), 84.0 (3.5), 70.0 (7.6), 67.0 (3.8), 57.0 (4.7), 56.0 (12.6), 55.1 (6.3), 44.1 (5.7), 41.0 (7.7). **N-Бутиланилин**, выход 33.4%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 150.0 (8.1) [$M + 1$]⁺, 149.0 (23.7) [M]⁺, 148.1 (2.5) [$M - 1$]⁺, 118.0 (2.8), 107.0 (6.8), 106.1 (100), 104.0 (2.7), 79.1 (10.9), 78.2 (3.1), 77.0 (15.9), 65.1 (3.9), 51.0 (5.9), 50.0 (3.4).

б. На катализатор Ni⁰/NaX массой 2 г при 200°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь бутанала **1б** и циклогексиламина **2д** (мольное соотношение реагентов **1б:2д** = 1:1) с расходом 1.8 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия альдегида **1б** 100%, селективность по продукту реакции **3м** 97%, выход 97%.

N-Гексилциклогексанамина (3н). На катализатор Ni⁰/NaX массой 4 г при 240°C подавали водород с расходом 750 л/(кг_{кат}·ч), циклогексанон **1к** с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч) и гексиламин **2г** с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1к:2г** = 1:1). Конверсия кетона **1к** 100%, селективность по продукту реакции **3н** 86%, выход 86%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 185.1 (12) [$M + 2$]⁺, 184.2 (100) [$M + 1$]⁺, 140.3 (4.2), 112.2 (9.7), 56 (1.8). **Дигексиламин**, выход 13.7%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 187.1 (4.6) [$M + 2$]⁺, 186.1 (31.8) [$M + 1$]⁺, 184.3 (2.5) [$M - 1$]⁺, 115.0 (4.7), 114.1 (55.8), 56.0 (3.1), 55.1 (3.4), 45.1 (2.8), 44.2 (100), 43.2 (8.5), 42.2 (4.8), 41.1 (7.5).

N-Циклогексиланилин (3о). На катализатор Ni⁰/MgO массой 2 г при 200°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч), циклогексанон **1к** с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч) и анилин **2е** с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч) (мольное соотношение реагентов **1к:2е** = 1:1). Конверсия циклогексанона **1к** 79%, селективность по продукту реакции **3о** 88.5%, выход 70%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 177.0 (3.8) [$M + 2$]⁺, 176.0 (33.8) [$M + 1$]⁺, 175.0 (67.1) [M]⁺, 146.0 (7.3), 133.0 (10.7), 132.0 (100), 130.1 (5.0), 119.1 (8.7), 118.0 (18.6), 117.1 (11.5), 106.1 (6.8), 104.0 (4.3), 93.1 (6.5), 91.1 (5.7), 77.0 (9.9), 65.0 (4.9), 51.0 (7.1), 50.0 (4.3). **N-Фенилциклогексанимин**, выход 8.4%. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 175.0 (8.1) [$M + 2$]⁺, 174.0 (64.9) [$M + 1$]⁺, 173.0 (100) [M], 172.2 (13.4), 144.1 (8.7), 131.0 (8.8), 130.1 (83.4), 117.1 (6.5), 77.0 (5.6), 51.0 (4.7), 50.0 (2.8).

***N*-(Пентан-3-ил)пиперидин (3п).** На катализатор Ni⁰/NaX массой 4 г при 200°C подавали водород с расходом 250 л/(кг_{кат}·ч) и смесь пентан-3-она **1и** и пиперидина **2к** (мольное соотношение реагентов **1и:2к** = 1:3) с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия кетона **1и** 44.8%, селективность по продукту реакции **3п** 100%, выход 44.8%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 157.0 (1.1) [*M* + 2]⁺, 156.0 (8.7) [*M* + 1]⁺, 154.1 (3.2) [*M* – 1]⁺, 127.0 (10.3), 126.1 (100), 124.2 (2.5), 110.1 (1.4), 98.2 (1.6), 70.1 (1.4), 42.0 (2.1).

***N*-Циклогексилпиперидин (3р).** а. На катализатор Ni⁰/C массой 2 г при 160°C подавали водород с расходом 1500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь циклогексанона **1к** и пиперидина **2к** (мольное соотношение реагентов **1к:2к** = 1:2) с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия кетона **1к** 70.2%, селективность по продукту реакции **3р** 99.3%, выход 69.7%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 169.0 (4.3) [*M* + 2]⁺, 168.1 (35.3) [*M* + 1]⁺, 167.0 (13.3) [*M*]⁺, 166.2 (10.5) [*M* – 1]⁺, 138.1 (2.5), 125.0 (9.8), 124.1 (100), 122.3 (2.0), 110.1 (3.5), 96.3 (4.6).

б. На катализатор Ni⁰/NaX массой 2 г при 180°C подавали водород с расходом 500 л/(кг_{кат}·ч) и смесь циклогексанона **1к** и пиперидина **2к** (мольное соотношение реагентов **1к:2к** = 1:2) с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия кетона **1к** 96.7%, селективность по продукту реакции **3р** 98.5%, выход 95.2%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 169.0 (4.3) [*M* + 2]⁺, 168.1 (35.3) [*M* + 1]⁺, 167.0 (13.3) [*M*]⁺, 166.2 (10.5) [*M* – 1]⁺, 138.1 (2.5), 125.0 (9.8), 124.1 (100), 122.3 (2.0), 110.1 (3.5), 96.3 (4.6).

2-Метил-*N*-(1-фенилэтил)пропан-1-амин (3с). На катализатор Ni⁰/MgO массой 4 г при 180°C подавали водород с расходом 250 л/(кг_{кат}·ч) и смесь ацетофенона **1з** и изобутиламина **2б** (мольное соотношение реагентов **1з:2б** = 1:5) с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия кетона **1з** 100%, селективность по продукту реакции **3с** 42.4%, выход 42.4%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 178.8 (9.6) [*M* + 2]⁺, 177.9 (87.4) [*M* + 1]⁺, 176.2 (3.5) [*M* – 1]⁺, 162.0 (21.9), 133.9 (10.5), 105.9 (16.0), 105.0 (100), 104.2 (5.4), 103.1 (9.9), 79.1 (8.9), 77.0 (7.9), 51.0 (3.7), 41.0 (3.4). **Этилбензол**, выход 55.4%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 106.7 (2.9) [*M* + 1]⁺, 105.8 (33.1) [*M*]⁺, 105.0 (7.7) [*M* – 1]⁺, 102.9 (3.7), 91.9 (6.6), 91.0 (100), 79.0 (3.0), 78.1 (3.0), 77.0 (4.5), 65.0 (11.4), 63.0 (3.8), 51.0 (5.9), 50.0 (4.4).

***N*-(1-Фенилэтил)гексан-1-амин (3т).** На катализатор Ni⁰/NaX массой 4 г при 220°C подавали водород с расходом 750 л/(кг_{кат}·ч) и смесь ацетофенона **1з** и гексиламина **2г** (мольное соотношение реагентов **1з:2г** = 1:1.5) с расходом 0.9 л/(кг_{кат}·ч). Конверсия кетона **1з** 92.1%, селективность по продукту реакции **3т** 80.4%, выход 74%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 206.8 (11.2) [*M* + 2]⁺, 205.8 (100) [*M* + 1]⁺, 204.2 (3.9) [*M* – 1]⁺, 191.1 (9.2), 190.2 (63.1), 134.0 (4.3), 120.0 (6.1), 106.0 (17.6), 105.1 (53.6), 103.2 (5.9), 79.0 (6.9), 77.9 (3.7), 77.0 (6.5), 51.2 (3.5), 41.1 (5.5). **Дигексиламин**, выход 18.1%. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 186.9 (8.1) [*M* + 2]⁺, 186.0 (74.1) [*M* + 1]⁺, 184.5 (2.3) [*M*]⁺, 115.1 (4.1), 114.2 (29.6), 113.2 (6.6), 112.2 (2.6), 55.2 (2.8), 44.2 (100), 42.2 (4.6), 41.2 (6.6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Небыков Д.Н., Попов Ю.В., Мохов В.М., Латышова С.Е., Щербаклова К.В., Немцева Н.В., Шишкин Е.В. // ЖОХ. 2019. Т. 89. Вып. 10. С. 1479; *Nebykov D.N., Popov Yu.V., Mokhov V.M., Latyshova S.E., Shcherbakova K.V., Nemtseva N.V., Shishkin E.V.* // Russ. J. Gen. Chem. 2019. Vol. 89. N 10. P. 1985. doi 10.1134/S1070363219100013
2. *Higassio Y.S., Shoji T.* // Appl. Catal. (A). 2001. Vol. 221. N 1–2. P. 197. doi 10.1016/s0926-860x(01)00815-8
3. *Rani V.R., Srinivas N., Kulkarni S.J., Raghavan K.V.* // J. Mol. Catal. (A). 2002. Vol. 187. N 2. P. 237. doi 10.1016/s1381-1169(02)00208-x
4. *Ward J., Wohlgemuth R.* // Curr. Org. Chem. 2010. Vol. 14. N 17. P. 1914. doi 10.2174/138527210792927546
5. *Nador F., Moglie Y., Ciolino A., Pierini A., Dorn V., Yus M., Alonso F., Radivoy G.* // Tetrahedron Lett. 2012. Vol. 53. N 25. P. 3156. doi 10.1016/j.tetlet.2012.04.054
6. *Menche D., Bçhm S., Li J., Rudolph S., Zander W.* // Tetrahedron Lett. 2007. Vol. 48. N 3. P. 365. doi 10.1016/j.tetlet.2006.11.082
7. *Wang C., Pettman A., Basca J., Xiao J.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2010. Vol. 49. N 41. P. 7548. doi 10.1002/anie.201002944

8. Jung Y.J., Bae J.W., Park E.S., Chang Y.M., Yoon C.M. // *Tetrahedron*. 2003. Vol. 59. N 51. P. 10331. doi 10.1016/j.tet.2003.09.054
9. Quintin W.D., Marcus E. Pat. 4190601 (1978). USA.
10. Pillai R.B.C. // *Proc. Indian Nat. Sci. Acad.* 1995. Vol. 61. N 2A. P. 97.
11. Tararov V.I., Kadyrov R., Riermeier T.H., Börner A. // *Chem. Commun.* 2000. N 19. P. 1867. doi 10.1039/B005777K
12. Huang H., Zhao Y., Yang Y., Zhou L., Chang M. // *Org. Lett.* 2017. Vol. 19. N 8. P. 1942. doi 10.1021/acs.orglett.7b00212
13. Li C., Villa-Marcos B., Xiao J. // *J. Am. Chem. Soc.* 2009. Vol. 131. N 20. P. 6967. doi 10.1021/ja9021683
14. Santoro F., Psaro R., Ravasio N., Zaccheria F. // *ChemCatChem*. 2012. Vol. 4. N 9. P. 1249. doi 10.1002/cctc.201200213
15. Pisiewicz S., Stemmler T., Surkus A.-E., Junge K., Beller M. // *ChemCatChem*. 2015. Vol. 7. N 1. P. 62. doi 10.1002/cctc.201402527
16. Domine M.E., Hernández-Soto M.C., Navarro M.T., Pérez Y. // *Catalysis Today*. 2011. Vol. 172. N 1. P. 13. doi 10.1016/j.cattod.2011.05.013
17. Liu J., Fitzgerald A.E., Mani N.S. // *Synthesis*. 2012. Vol. 44. N 15. P. 2469. doi 10.1055/s-0032-1316550
18. Sharma S.K., Lynch J., Sobolewska A.M., Plucinski P., Watson R.J., Williams J.J.M. // *Catal. Sci. Technol.* 2013. Vol. 3. P. 85. doi 10.1039/C2CY20431B
19. Zotova N., Roberts F.J., Kelsall G.H., Jessiman A.S., Hellgardt K., Hii K.K. // *Green Chem.* 2012. Vol. 14. P. 226. doi 10.1039/C1GC16118K
20. Chieffi G., Braun M., Esposito D. // *ChemSusChem*. 2015. Vol. 8. N 21. P. 3590. doi 10.1002/cssc.201500804
21. Falus P., Boros Z., Hornyanszky G., Nagy J., Darvas F., Urge L., Poppe L. // *Tetrahedron Lett.* 2011. Vol. 52. P. 1310. doi 10.1016/j.tetlet.2011.01.062
22. Laroche B., Ishitani H., Kobayashi Sh. // *Adv. Synth. Catal.* 2018. Vol. 360. P. 4699. doi 10.1002/adsc.201801457
23. Попов Ю.В., Мохов В.М., Латышова С.Е., Небыков Д.Н., Панов А.О., Давыдова Т.М. // *ЖОХ*. 2018. Т. 88. Вып. 10. С. 1585; Попов Ю.В., Мохов В.М., Латышова С.Е., Небыков Д.Н., Панов А.О., Давыдова Т.М. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. Vol. 88. N 10. P. 2035. doi 10.1134/S1070363218100018
24. Попов Ю.В., Мохов В.М., Небыков Д.Н., Щербакowa К.В., Донцова А.А. // *ЖОХ*. 2018. Т. 88. Вып. 1. С. 23; Попов Ю.В., Мохов В.М., Небыков Д.Н., Щербакowa К.В., Донцова А.А. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. Vol. 88. N 1. P. 20. doi 10.1134/S1070363218010048
25. Попов Ю.В., Мохов В.М., Латышова С.Е., Небыков Д.Н., Панов А.О., Плетнева М.Ю. // *ЖОХ*. 2017. Т. 87. Вып. 10. С. 1616; Попов Ю.В., Мохов В.М., Латышова С.Е., Небыков Д.Н., Панов А.О., Плетнева М.Ю. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2017. Vol. 87. N 10. P. 2276. doi 10.1134/S107036321710005X
26. Мохов В.М., Попов Ю.В., Небыков Д.Н. // *ЖОХ*. 2014. Т. 84. Вып. 9. С. 1414; Мохов В.М., Попов Ю.В., Небыков Д.Н. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2014. Vol. 84. N 9. P. 1656. doi 10.1134/S1070363214090023

Colloidal and Nanosized Catalysts in Organic Synthesis: XXIII. Reductive Amination of Carbonyl Compounds in Continuous Flow Reactor Catalyzed by Nickel Nanoparticles

V. M. Mokhov*, Yu. V. Popov, A. N. Paputina, D. N. Nebykov, and E. V. Shishkin

Volgograd State Technical University, pr. Lenina 28, Volgograd, 400005 Russia

*e-mail: tons@vstu.ru

Received May 30, 2019; revised May 30, 2019; accepted June 6, 2019

The reductive amination of aldehydes and ketones with primary and secondary amines under catalysis with nickel nanoparticles supported on zeolite X, MgO or activated carbon in a continuous flow reactor in the gas phase or in the gas-liquid system proceeds at atmospheric pressure of hydrogen with the formation of secondary or tertiary amines with high yields.

Keywords: catalysis, nanoparticles, nickel, hydrogenation, reductive amination, amines