

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ И ГАЗА

DOI: 10.15593/2224-9400/2020.1.04

УДК 665.644.2

А.Н. Чудинов, В.Г. Рябов, Д.В. Першин

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА НА ВЫХОД ПРОПИЛЕНА

Низшие олефины (C_2 – C_4) являются одним из ключевых сырьевых компонентов нефтехимических процессов, в частности в производстве полимерных материалов: полиэтилена, полипропилена, сополимеров этилена с бутенами, метилтретбутилового эфира, акрилонитрила, акриловой и метакриловой кислот, в процессах алкилирования для получения высокооктанового компонента бензина и др.

Основным источником олефинов на сегодняшний день является процесс пиролиза. Например, 60–65 % мирового пропилена приходится именно на пиролиз. Однако темпы роста потребления пропилена таковы, что удовлетворять их лишь за счет мощностей пиролизных установок становится затруднительно [1]. К недостаткам процесса пиролиза можно отнести значительную энергоемкость и недостаточную гибкость в плане варьирования соотношения этилен/пропилен в продуктах реакции [2].

Вторым крупномасштабным процессом, в продуктах которого присутствует значительное количество олефинов, является каталитический крекинг в псевдоожигенном слое катализатора (FCC). На сегодняшний день основным продуктом FCC являются высокооктановые компоненты бензина. Однако следует отметить, что процесс FCC позволяет получать довольно широкий спектр ценных продуктов, в том числе, помимо моторного топлива, и легкие углеводороды C_2 – C_4 [3].

Селективность процесса FCC по тому или иному продукту зависит от ряда факторов: температуры, типа катализатора и качества вовлекаемого в переработку сырья.

В данной работе представлены результаты исследования зависимости величины выхода пропилена и бутан-бутеновой фракции, образующихся в процессе FCC, от состава и свойств используемых сырьевых компонентов. С этой целью был выполнен ряд анализов для определения основных параметров вакуумных дистиллятов – сырьевых компонентов FCC: фракционный и групповой состав, плотность, коксуемость по Конрадсону. Осуществлено превращение сырьевых компонентов в процессе FCC и исследован состав полученных продуктов.

Ключевые слова: каталитический крекинг в псевдоожигенном слое, вакуумный газойль, нефтепереработка, пропилен, бутан, бутены.

A.N. Chudinov, V.G. Ryabov, D.V. Pershin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE INFLUENCE OF THE FEED QUALITY AND COMPOSITION ON THE PROPYLENE YIELD DURING THE CATALYTICAL CRACKING PROCESS

Low-weight olefins (C_2 – C_4) are raw material of great importance in the field of petrochemical industry. They are used in the alkylation process (butenes) to produce polymers (polyethylene, polypropylene, ethylene and butene copolymers), methyl tert-butyl ether, acrylonitrile, acrylic and methacrylic acids etc.

The key process to obtain olefins is steam cracking (SC). About 60–65 % of world propylene production amount is gained by SC. But growing world propylene demand makes SC capacity insufficient [1]. Beside this the SC process has several disadvantages such as high energy consumption, and low flexibility to vary ethylene/propylene ratio [2].

Another large-scale process producing high amount of propylene is fluidized catalytical cracking (FCC). The main FCC product is high-octane gasoline, but this process allows producing wide range of valuable products, including light olefins [3].

FCC selectivity for any of its products depends on several factors: temperature, catalyst type, and feed quality.

This paper describes how composition and quality of the FCC feed can affect the propylene, butanes and butenes yields. To establish this dependence boiling point distribution, hydrocarbon group composition, specific gravity, Conradson carbon were measured for four FCC feed components, as well as feed conversion during FCC process was carried out.

Keywords: *fluidized catalytical cracking, vacuum gasoil, oil processing, propylene, butane, butenes.*

Каталитический крекинг в псевдоожиженном слое катализатора (FCC) играет одну из ведущих ролей в комплексе процессов переработки нефти, поскольку FCC позволяет из малоценного тяжелого сырья получать высококачественный компонент автобензина с октановым числом 89–94 (ИМ) или 80–95 (ММ). При этом образуется значительное количество газа, богатого пропан-пропиленовой и бутан-бутиленовой фракциями. Установки каталитического крекинга являются также источником сырья для химической промышленности: из газойлей крекинга получают сажевое сырье и нафталин, тяжелый газойль может служить сырьем для производства высококачественного «игольчатого» кокса [4].

На сегодняшний день известно несколько путей повышения производительности установок FCC по олефинам в целом и по пропилену в частности: разработка новых катализаторов и добавок к ним, модификация условий проведения и аппаратного оформления процесса. Одним из

вариантов увеличения выхода легких олефинов является введение в каталитическую систему добавки ZSM-5 [5, 6]. С одной стороны, цеолит ZSM-5 препятствует бимолекулярным реакциям, что в итоге приводит к уменьшению содержания олефинов C_{5+} в продуктах крекинга [7]. Цеолит ZSM-5 селективно катализирует крекинг олефинов C_{5+} с образованием более легких алкенов C_2-C_4 , в результате чего возрастает выход пропилена и бутенов, а в бензине FCC снижается содержание непредельных углеводородов, ухудшающих его качество [8, 9]. В то же время эффективность ZSM-5 в процессе крекинга тяжелого сырья снижается, поэтому его содержание в каталитической системе должно быть ограничено.

Существуют модификации ZSM-5 для увеличения выхода легких олефинов, в частности предложена модификация катализатора HZSM-5 [10]. Варьирование структуры цеолита, а именно изменение соотношения Si/Al от 30 до 280 позволило увеличить выход легких олефинов (C_2-C_4) с 18,1 до 27,4 мас. %. В дальнейшем катализатор был модифицирован марганцем, что позволило увеличить выход легких олефинов до 29,2 мас. %.

Помимо модифицирования старых катализаторов и синтеза новых, увеличить выход пропилена можно изменением параметров режима FCC. Для дальнейшего улучшения производства легких олефинов были разработаны различные специальные FCC-процессы, протекающие в жестких условиях с применением олефин-селективного катализатора.

Компаниями Kellogg и Mobil совместно разработан и внедрен в промышленность в 1998 г. процесс MAXOFIN (MAXimize OleFINs). Процесс основан на двухреакторной системе Orthoflow, состоящей из реактора с системой внутренних циклонных сепараторов, регенератора RegenMax, отпарной колонны и распыла сырья Atomax2. В процессе используется катализатор фирмы Grace (ультрастабильный цеолит Y), а также катализаторная добавка Maxofin-3 с высоким содержанием цеолита ZSM-5. Уровень отбора пропилена в процессе составляет 18–24 мас. % [11, 12].

Компания UOP предложила свой процесс каталитического крекинга для получения пропилена с выходом 20–24 мас. % в 2000 г. В 2008 г. этот процесс (называемый PetroFCC) был введен на заводе Petron Corporation plant (Филиппины). Процесс PetroFCC включает в себя запатентованные технологии RxCAT и RxPRO. Технология TheRxCAT включает рециркуляцию некоторой части закоксованного катализатора

в обход регенератора в зону смешения исходного материала и регенерированного катализатора, что увеличивает конверсию и селективность крекинга. В состав катализатора входят цеолиты Y и ZSM-5. Первый промышленный запуск RxCAT был проведен в США в апреле 2005 г. По состоянию на 2015 г. данная технология использовалась в 6 подразделениях в Азии. Еще 12 находились на стадии строительства. В процессе RxPRO C₄–C₇ алкены, образовавшиеся на первой стадии, подаются в реактор второй ступени, что приводит к дополнительному увеличению выхода пропилена на 5 мас. % и более [13].

В работе [14] предлагается проведение каталитического крекинга в псевдоожиженном слое в очень жестких условиях (HSFCC), а именно при температуре 600 °C, времени контакта 0,5 с и соотношении катализатора к сырью, равном 30. Выход пропилена составляет 25 мас. %, бензина – 30 мас. %.

Следует, однако, отметить, что состав и качество продуктов, получаемых в процессе FCC, будет в значительной степени определяться в том числе составом и свойствами сырьевых компонентов, вовлекаемых в переработку.

Экспериментальная часть. В рамках данной работы было исследован состав и свойства четырех вакуумных дистиллятных фракций – потенциальных сырьевых компонентов FCC, рассмотрено влияние изученных параметров на выход легких олефиновых углеводородов (пропилен, бутены), образующихся в процессе FCC. Крекинг сырьевых компонентов осуществляли в соответствии со стандартом ASTM D7206/D7206M на установке ACE R+ (Kayser Technology Inc., США). Температуру реакции поддерживали на уровне 540±2 °C, режим псевдоожижения создавали с помощью азота (99,999 %). По окончании процесса крекинга определяли количество кокса на катализаторе, компонентный состав газообразных продуктов (H₂, C₁–C₆), а также фракционный состав жидких продуктов FCC. На основании полученных данных рассчитывали степень конверсии для каждого сырьевого компонента.

Для всех исследуемых сырьевых компонентов перед их превращением в процессе крекинга были определены следующие параметры: фракционный и групповой углеводородный состав, плотность, индекс рефракции, молекулярный вес, коксуемость, бромное число, зольность, содержание серы, азота. Для всех сырьевых компонентов был рассчитан характеристический К-фактор.

Анализ фракционного состава сырьевых компонентов и продуктов крекинга выполняли на хроматографе Agilent 7890B в соответствии со стандартами ASTM D2887 и D7213.

Определение группового углеводородного состава исследуемых компонентов включало в себя анализ концентрации парафинонафтеновых углеводородов, моно-, би-, три- и полициклических аренов с помощью ВЭЖХ на приборе Varian ProStar 210.

Плотность сырьевых компонентов измеряли на приборе Mettler-Toledo DE40 по методике, описанной в стандарте ASTM D5002.

Индекс рефракции определяли на рефрактометре УРЛ Модель-1 при 50 °С, так как при меньших температурах не все сырьевые компоненты прозрачны и находятся в текучем состоянии.

Молекулярную массу определяли криоскопическим методом на приборе Бэкмана. Коксуемость сырьевых компонентов измеряли на микроанализаторе коксового остатка и зольности Normalab Analis NMC 440 по стандарту ASTM D4530. Бромное число образцов измеряли по ГОСТ 2706.11–74.

Содержание серы в исследуемых образцах определяли с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра Элватех ElvaX. Содержание азота измеряли на анализаторе Multi EA 5000 (производство Analytik Jena) с хемилюминисцентным детектором.

Методами газовой хроматографии на приборе Agilent 7890B определяли также компонентный состав газообразных продуктов.

Результаты и их обсуждение. В данной работе в качестве объектов исследования были выбраны 4 сырьевых компонента. Результаты анализа состава и свойств данных сырьевых компонентов представлены в табл. 1 и 2.

В процесс каталитического крекинга в качестве сырья вовлекают вакуумные дистилляты широкого фракционного состава (350–500 °С). К их фракционному составу предъявляется ряд требований [15]:

1) отсутствие бензинолигроиновых фракций, поскольку они при данных условиях практически не претерпевают изменений и фактически являются балластом;

2) ограниченное (до 10 мас. %) содержание фракций, выкипающих до 350 °С, что обусловлено их низкой степенью конверсии и негативно сказывается на эффективности процесса крекинга в целом;

3) ограниченная температура конца кипения 500–620 °С, так как в более тяжелых фракциях концентрируются асфальтены и гетероорга-

нические соединения, вызывающие закоксовывание катализатора и его отравление азотом и тяжелыми металлами.

Таблица 1

Фракционный состав сырьевых компонентов

Фракционный состав, мас. %	Компонент			
	1	2	3	4
н.к.	244,4	329,6	354,2	365,0
10	363,6	406,8	439,0	456,6
20	379,8	424,2	455,2	477,8
30	390,2	435,4	465,6	490,8
40	398,2	443,6	474,2	500,2
50	405,6	450,4	481,8	508,2
60	412,0	456,8	489,2	515,4
70	418,8	463,0	496,8	522,6
80	426,0	470,0	504,8	530,0
90	435,2	479,6	515,0	539,8
к.к.	465,8	510,4	542,2	572,0

Как видно из данных, представленных в табл. 1, все рассмотренные сырьевые компоненты отвечают указанным требованиям. Наиболее широкие температурные пределы выкипания определены для образца 4 (см. табл. 1), этот же образец является наиболее тяжелым. Наиболее легкокипящий компонент среди изученных – образец 1.

В табл. 2 представлены результаты определения физико-химических свойств исследуемых сырьевых компонентов.

Таблица 2

Свойства сырьевых компонентов

Показатель	Компонент			
	1	2	3	4
Плотность при 15 °С, кг/м ³	907,9	921,3	931,0	947,1
Коксуемость, мас. %	0,01	0,03	0,34	1,01
Индекс рефракции n_D^{50}	1,4942	1,5020	1,5090	1,5122
Содержание серы, мас. %	2,20	2,29	2,35	2,68
Содержание азота, мас. %	0,074	0,085	0,115	0,141

Индекс рефракции сырьевых компонентов позволяет характеризовать степень их ароматизации. Чем выше индекс, тем больше содержится в образце ароматических углеводородов и тем меньше такой об-

разец пригоден для крекинга. Наиболее высокое значение индекса рефракции характерно для компонента 4, который также отличается наиболее высоким значением плотности, т.е. может содержать в своем составе наибольшее количество ароматических углеводородов.

Для всех исследуемых сырьевых компонентов был определен параметр коксуемости по Конрадсону (см. табл. 2). Цель анализа – определение коксообразующей способности сырьевых компонентов. Компонент 4, показал наибольшую коксуемость по Конрадсону среди исследованных образцов сырья, а наименьшую – образец 1.

Содержание серы в компонентах колеблется в интервале 2,0–2,5 мас. % и увеличивается по мере роста температурных пределов выкипания. Наименьшая концентрация сернистых соединений отмечена для компонента 3, который также характеризуется низким содержанием азота, что может свидетельствовать о наличии в данном компоненте вторичных продуктов гидрогенизационных процессов.

Полученные результаты анализа сырьевых компонентов (см. табл. 1 и 2) свидетельствуют о том, что по мере утяжеления фракционного состава сырьевых компонентов наблюдается плавный рост значений их параметров: плотности, коксуемости, индекса рефракции, содержания серы и азота. Это говорит о росте содержания в составе сырья полиароматических соединений и согласуется с литературными данными [4, 15].

Анализ группового углеводородного состава сырьевых компонентов, выполненный с помощью ВЭЖХ (табл. 3) подтверждает выводы о повышении степени ароматизации исследованных образцов сырья. Наибольшее количество три- и полициклических соединений обнаружено в компоненте 4, в то время как образец 1 содержит в своем составе самое высокое количество парафинонафтовых углеводородов, которые являются наиболее благоприятными компонентами в сырье крекинга.

Все сырьевые компоненты были подвергнуты крекингу в псевдоожигенном слое при температуре 540 °С и соотношении катализатор/сырье (К/С), равном 5. Результаты превращения компонентов представлены в табл. 4.

Сопоставляя данные по превращению сырьевых компонентов с их групповым составом, можно утверждать, что степень конверсии и выход бензина снижаются с увеличением температурных пределов выкипания сырьевых компонентов и, как следствие, с уменьшением концентрации

парафиновых углеводородов (см. табл. 4). При этом возрастает выход сухого газа и увеличивается количество кокса на катализаторе.

Таблица 3

Групповой углеводородный состав сырьевых компонентов

Группа углеводородов, мас. %	Компонент			
	1	2	3	4
Парафинонафтеновые углеводороды	34,7	32,1	19,8	17,6
Моноциклические арены	33,2	31,9	35,3	25,1
Бициклические арены	25,0	26,1	31,0	39,5
Трициклические арены	6,9	8,5	12,1	15,4
Полициклические арены	0,2	1,4	1,8	2,4

Таблица 4

Результаты превращения сырьевых компонентов
в процессе FCC

Показатель	Компонент			
	1	2	3	4
Степень конверсии, мас. %	76,31	74,86	73,19	72,81
Материальный баланс, мас. %:				
сухой газ	2,47	2,48	2,57	2,71
фракция C ₃	8,85	8,26	7,84	7,76
фракция C ₄	14,05	13,01	12,18	11,95
бензин (н.к.–221 °С)	47,09	47,29	46,32	45,29
фракция 221–360 °С	16,61	17,21	17,92	18,48
фракция > 360 °С	7,08	7,93	8,89	8,72
кокс	3,85	3,81	4,27	5,09

Более подробный анализ компонентов фракции C₃–C₄ (табл. 5) позволил заключить, что выход пропилена, бутанов и бутенов также зависит от содержания парафинонафтеновых углеводородов в сырье и снижается с сокращением их количества, за исключением изобутилена, выход которого несколько повышается при увеличении температурных пределов выкипания сырьевых компонентов.

Таблица 5

Состав углеводородов C_3 – C_4 в продуктах
крекинга сырьевых компонентов

Углеводород	Компонент			
	1	2	3	4
Пропан	1,52	1,34	1,24	1,24
Пропилен	7,33	6,92	6,61	6,52
<i>n</i> -Бутан	1,16	1,00	0,89	0,89
Изобутан	5,26	4,48	3,76	3,54
Бутен-1	1,62	1,58	1,55	1,55
Бутен-2	3,85	3,70	3,61	3,58
Изобутилен	1,64	2,25	2,37	2,39

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных можно утверждать следующее:

1. При повышении температурных пределов выкипания сырьевых компонентов в них увеличивается содержание полиароматических соединений, что приводит к росту доли реакций уплотнения в процессе крекинга. При этом снижается степень конверсии и увеличивается выход кокса.

2. Выход легких олефинов напрямую зависит от фракционного и группового состава сырьевых компонентов: по мере утяжеления фракционного состава и снижения концентрации парафинафтоновых углеводородов в сырье выход пропилена, бутанов и бутенов снижается. Исключение составляет изобутилен, концентрация которого в газообразных продуктах крекинга в указанных условиях возрастает.

3. Среди изученных сырьевых компонентов наиболее подходящим для получения максимального выхода пропилена и бутенов-1, 2 является образец 1, для наибольшего выхода изобутилена предпочтительным становится образец 4.

Исследования выполнены с использованием оборудования Научно-образовательного центра испытаний и исследований катализаторов процесса крекинга в псевдоожигенном слое (FCC) Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Список литературы

1. Akah A., Al-Ghrami M. Maximizing propylene production via FCC technology // *Appl Petrochem Res.* – 2015. – Vol. 5, iss. 4. – P. 377–392.
2. ZSM-5 Zeolite Based Additive In Fcc Process: A review on modifications for improving propylene production / M.F. Alotibi, B.A. Alshammari, M.H. Alotaibi [et al.] // *Catalysis Surveys from Asia.* – 2020. – Vol. 24, iss. 1. – P. 1–10.
3. Задегбейджи Р. Каталитический крекинг в псевдоожигенном слое катализатора: справочник по эксплуатации, проектированию и оптимизации установок ККФ: пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2014. – 384 с.
4. Капустин В.М., Гуреев А.А. Технология переработки нефти: в 2 ч. – Ч. 2. Деструктивные процессы. – М.: Химия, 2015. – 400 с.
5. Knight J., Mehlberg R. Maximize propylene from your FCC unit // *Hydrocarbon Processing.* – 2011. – Vol. 90. – P. 91–95.
6. Li C., Yang C., Shan H. Maximizing propylene yield by two-stage riser catalytic cracking of heavy oil // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2007. – Vol. 46, iss. 14. – P. 4914–4920.
7. Ren T., Patel M., Blok K. Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes // *Energy.* – 2006. – Vol. 31, iss. 4. – P. 425–451.
8. Adewuyi Y., Klocke D., Buchanan J. Effects of high-level additions of ZSM-5 to a fluid catalytic cracking (FCC) RE-USY catalyst // *Appl. Catal. A: Gen.* – 1995. – Vol. 131, iss. 1. – P. 121–133.
9. Effect of HZSM-5 zeolite addition to a fluid catalytic cracking catalyst. Study in a laboratory reactor operating under industrial conditions / J.M. Arandes, I. Abajo, I. Fernandez, M.J. Azkoiti, J. Bilbao // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2000. – Vol. 39, iss. 6. – P. 1917–1924.
10. Zhao X., Harding R. H. ZSM-5 additive in fluid catalytic cracking. 2. Effect of hydrogen transfer characteristics of the base cracking catalysts and feedstocks // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1999. – Vol. 38, iss. 10. – P. 3854–3859.
11. Determination of the pore topology of zeolite IM-5 by means of catalytic test reactions and hydrocarbon adsorption measurements / A. Corma, A. Chica, J.M. Guil, F.J. Llopis, G. Mabilon, J.A. Perdigon-Melon, S. Valencia // *J. Catal.* – 2000. – Vol. 189, iss. 2. – P. 382–394.
12. Catalytic cracking of vacuum gasoil over -SVR, ITH, and MFI zeolites as FCC catalyst additives / A. Hussain, A. Palani, A. Aitani, J. Cejka, M. Shamzhy, M. Kubů, S. Khattaf // *Fuel Processing Technology.* – 2017. – Vol. 161, iss. 15. – P. 23–32.

13. Enhancing propylene production from catalytic cracking of Arabian Light VGO over novel zeolites as FCC catalyst additives / M.A.B. Siddiqui, A.M. Aitani, M.R. Saeed, N. Al-Yassir, S. Al-Khattaf // *Fuel*. – 2011. – Vol. 90, iss. 2. – P. 459–466.

14. Henry B.E., Wachter W.A., Swan A.G. Fluid cat cracking with high olefins production. Patent US 7,261,807. – 2006.

15. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа: учеб. пособие для вузов. – Уфа: Гилем, 2002. – 672 с.

References

1. Akah, A., Al-Ghrami M. Maximizing propylene production via FCC technology. *Appl Petrochem Res*. 2015, vol. 5, iss. 4, pp. 377–392.

2. Alotibi M.F., Alshammari B.A., Alotaibi M.H. et al. ZSM-5 Zeolite Based Additive in FCC Process: A Review on Modifications for Improving Propylene Production. *Catalysis Surveys from Asia*. 2020, vol. 24, iss. 1 pp 1–10.

3. Zadegeidzhi R. Kataliticheskie kreking v psevdoozhizhennom sloe katalizatora [Catalytic cracking fluidized-bed catalyst]. Saint Petersburg, Professia, 2014, 384 p.

4. Kapustin V.M., Gureev A.A. Tekhnologiya pererabotki nefi. Chast 2. Fiziko-khimicheskie protsessy [The technology of oil refining. Part 2. Physico-chemical processes]. Moscow, Khimiia, 2015, 400 p.

5. Knight J., Mehlberg R. Maximize propylene from your FCC unit. *Hydrocarbon Processing*. 2011, vol. 90, pp. 91–95.

6. Li C., Yang C., Shan H. Maximizing propylene yield by two-stage riser catalytic cracking of heavy oil. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2007, vol. 46, iss. 14 pp. 4914-4920.

7. Ren T., Patel M., Blok K. Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. *Energy* 2006, vol. 31, iss. 4, pp. 425-451.

8. Adewuyi Y., Klocke D., Buchanan J. Effects of high-level additions of ZSM-5 to a fluid catalytic cracking (FCC) RE-USY catalyst. *Appl. Catal. A: Gen*. 1995, vol. 131, iss. 1, pp. 121-133.

9. Arandes J. M., Abajo I., Fernandez I., Azkoiti M. J., Bilbao J. Effect of HZSM-5 zeolite addition to a fluid catalytic cracking catalyst. Study in a laboratory reactor operating under industrial conditions. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2000, vol. 39, iss. 6, pp. 1917-1924.

10. Zhao X., Harding R. H. ZSM-5 additive in fluid catalytic cracking. 2. Effect of hydrogen transfer characteristics of the base cracking catalysts and feedstocks. *Ind. Eng. Chem. Res*. 1999, vol. 38, iss. 10, pp. 3854-3859.

11. Corma A., Chica A., Guil J. M., Llopis F. J., Mabilon G., Perdigon-Melon J. A., Valencia S. Determination of the pore topology of zeolite IM-5 by means of catalytic test reactions and hydrocarbon adsorption measurements. *J Catal.* 2000, vol. 189, iss. 2, pp. 382–394.

12. Hussain A., Palani A., Aitani A., Cejka, J., Shamzhy M., Kubů M., Khattaf S. Catalytic cracking of vacuum gasoil over -SVR, ITH, and MFI zeolites as FCC catalyst additives. *Fuel Processing Technology.* 2017, vol. 161, iss. 15, pp. 23-32.

13. Siddiqui M.A.B., Aitani A.M., Saeed M.R., Al-Yassir N., Al-Khattaf S. Enhancing propylene production from catalytic cracking of Arabian Light VGO over novel zeolites as FCC catalyst additives. *Fuel.* 2011, vol. 90, iss. 2, pp. 459-466.

14. Henry B.E., Wachter W.A., Swan A.G. Fluid cat cracking with high olefins production. U.S. patent 7,261,807 (2002).

15. Akhmetov S. A. Tekhnologiya glubokoi pererabotki nefi i gaza [Technology of deep oil and gas processing]. Ufa: Gilem, 2002, 672 p.

Получено 01.02.2020

Об авторах

Чудинов Александр Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: CHudinovAN@pstu.ru).

Рябов Валерий Германович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, декан факультета химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: rvg@pstu.ru).

Першин Даниэль Владимирович (Пермь, Россия) – ассистент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: daniel-pershin@mail.ru).

About the authors

Aleksandr N. Chudinov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Perm Na-

tional Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: CHudinovAN@pstu.ru).

Valery G. Ryabov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Chemical Technologies, Industrial Ecology and Biotechnologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: rvg@pstu.ru).

Daniel V. Pershin (Perm, Russian Federation) – Assistant, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: daniel-pershin@mail.ru).