

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 661.183; 66.074.31

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-65-73

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ АДСОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ЦЕОЛИТОВ**Гафарова Элиза Багаутдиновна*, Мельников Вячеслав Борисович, Федорова Елена Борисовна, Макарова Наталья Петровна**

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

*для корреспонденции: gafarovaeliza@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

08 июля 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

29 сентября 2024 г.

Принята к публикации:

10 октября 2024 г.

Опубликована:

24 октября 2024 г.

Ключевые слова:*сжиженный природный газ, адсорбционная осушка, цеолиты, динамическая активность, влагосодержание газа, импортозамещение***Аннотация.**

В статье изложены результаты сравнительных исследований динамической адсорбционной активности отечественных и зарубежных промышленных адсорбентов цеолитного типа для глубокой осушки природного газа при производстве СПГ и других процессах, требующих аналогичной степени осушки. Были исследованы отечественные и зарубежные адсорбенты цеолитного типа марки NaX-BC, 13X (BASF), NaA-BC и 4A(BASF) в динамических условиях осушки газа. В качестве газа использованы насыщенные влагой метан и воздух (как модельный газ). В результате проведенных исследований было установлено, что в исследуемом интервале температур и объемных скоростях осушаемого газа NaA-BC проявляет наиболее высокую динамическую адсорбционную активность в осушке воздуха и метана. Исследована стабильность динамической адсорбционной активности адсорбентов в 70 циклах адсорбция-регенерация в осушке воздуха. Установлено, что с увеличением циклов адсорбция-регенерация у всех адсорбентов уменьшается динамическая активность. Установлено, что максимальное значение времени защитного действия слоя адсорбента имеет NaA-BC.

Полученные авторами результаты показывают, что цеолиты отечественного производства по адсорбционным характеристикам не уступают зарубежным аналогам и даже несколько превосходят их. Результаты исследований позволяют использовать отечественные адсорбенты в целях импортозамещения в глубокой осушке природного газа при производстве СПГ и других процессах, требующих аналогичной степени осушки.

Для цитирования: Гафарова Э. Б., Мельников В. Б., Федорова Е. Б., Макарова Н. П. Сравнительные исследования динамической адсорбционной активности отечественных и зарубежных цеолитов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5 (165). С. 65-73. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-65-73, EDN: QPSJJP

Введение. Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 16 марта 2021 года № 640-р до 2035 года объем производства сжиженного природного газа (СПГ) в России может увеличиться почти в три раза и достичь 140 млн т. В документе представлены различные мероприятия, направленные на повышение конкурентоспособности отрасли. Важнейшей предпосылкой для развития станет расширение использования российских технологий и

оборудования, предназначенных для сжижения и очистки газа, специальных компрессоров, криогенных агрегатов, автономных СПГ-энергетических комплексов и интегрированных систем управления [1, 2].

Особенно актуальным становится развитие производства СПГ, так как это будет способствовать реализации национальных проектов по ускорению газификации и обеспечению энергоресурсами регионов,

расположенных вдали от магистральных газопроводов [3].

В этом направлении глубокая адсорбционная осушка природного газа является одним из ключевых процессов в производстве СПГ, так как позволяет удалить из газа влагу, сероводород, углеводороды и другие примеси, которые могут негативно сказаться на качестве осуществления технологических процессов и долговечности оборудования, а также на безопасности процесса сжижения [4-7]. Наличие в газе паров воды вызывает серьезные проблемы при сжижении природного газа. При охлаждении паров в системе происходит конденсация водяных паров, которые с компонентами природного газа образуют газогидраты при определенных значениях давления и температуры и представляют собой кристаллические твердые соединения включения, состоящие из молекул воды и газа. Отложения газогидратов при производстве СПГ уменьшают площадь поперечного сечения трубопроводов и препятствуют теплообмену, увеличивают гидравлические сопротивления. Отлагаясь на технологических трубопроводах, дросселях или

адсорбентов, на многих предприятиях, включая заводы по сжижению природного газа, в процессе осушки газа используются зарубежные поглотители. Характеристики российских сорбентов практически не уступают по показателям адсорбционной емкости, насыпной массы и механической прочности их зарубежным аналогам и способны осушать газ до требуемой температуры точки росы по влаге согласно нормативным документам по производству СПГ.

– *Развитие научно-технического потенциала.* Внедрение отечественных адсорбентов стимулирует развитие научно-технического потенциала в России, способствуя созданию новых технологий и разработке инноваций в области производства СПГ, а также развитию научно-прикладных исследований по созданию новых адсорбентов для различных технологических процессов.

С помощью адсорбционной осушки возможно снижение точки росы газа по влаге ниже отметки минус 70°C. Глубина и эффективность прохождения процесса осушки газа в большой степени зависит от характеристик

Таблица 1. Характеристики адсорбентов

Table 1. Characteristics of adsorbents

Наименование показателя	Адсорбенты			
	NaX-BC	13X	NaA-BC	4A
Размер гранул, мм	3,6±0,4	2,5 – 3,5	3,6±0,4	2,5 – 3,5
Насыпная плотность, г/см ³	0,74	0,73	0,75	0,76
Прочность на раздавливание, кг/мм ²	2,8	2,9	3,4	2,5

попадая в детандер, они приводят к аварийным остановкам [6-8].

В связи с этим использование отечественных адсорбентов при глубокой адсорбционной осушке природного газа имеет ряд преимуществ:

– *Независимость от импорта.* Значимость импортозамещения адсорбентов для производства СПГ в РФ значительно возрастает в связи с санкциями, наложенными на некоторые российские компании, ограничениями на импорт технологий и расходных материалов, которые могут оказывать негативное влияние на доступность и стоимость импортных адсорбентов для использования в производстве СПГ. В такой ситуации развитие отечественного производства адсорбентов является стратегически важным, поскольку это позволяет обеспечить независимость от импорта и снизить риски снабжения.

– *Экономическая эффективность.* Отечественные адсорбенты должны быть более доступны по цене, что позволяет снизить стоимость производства СПГ и повысить его конкурентоспособность на мировом рынке.

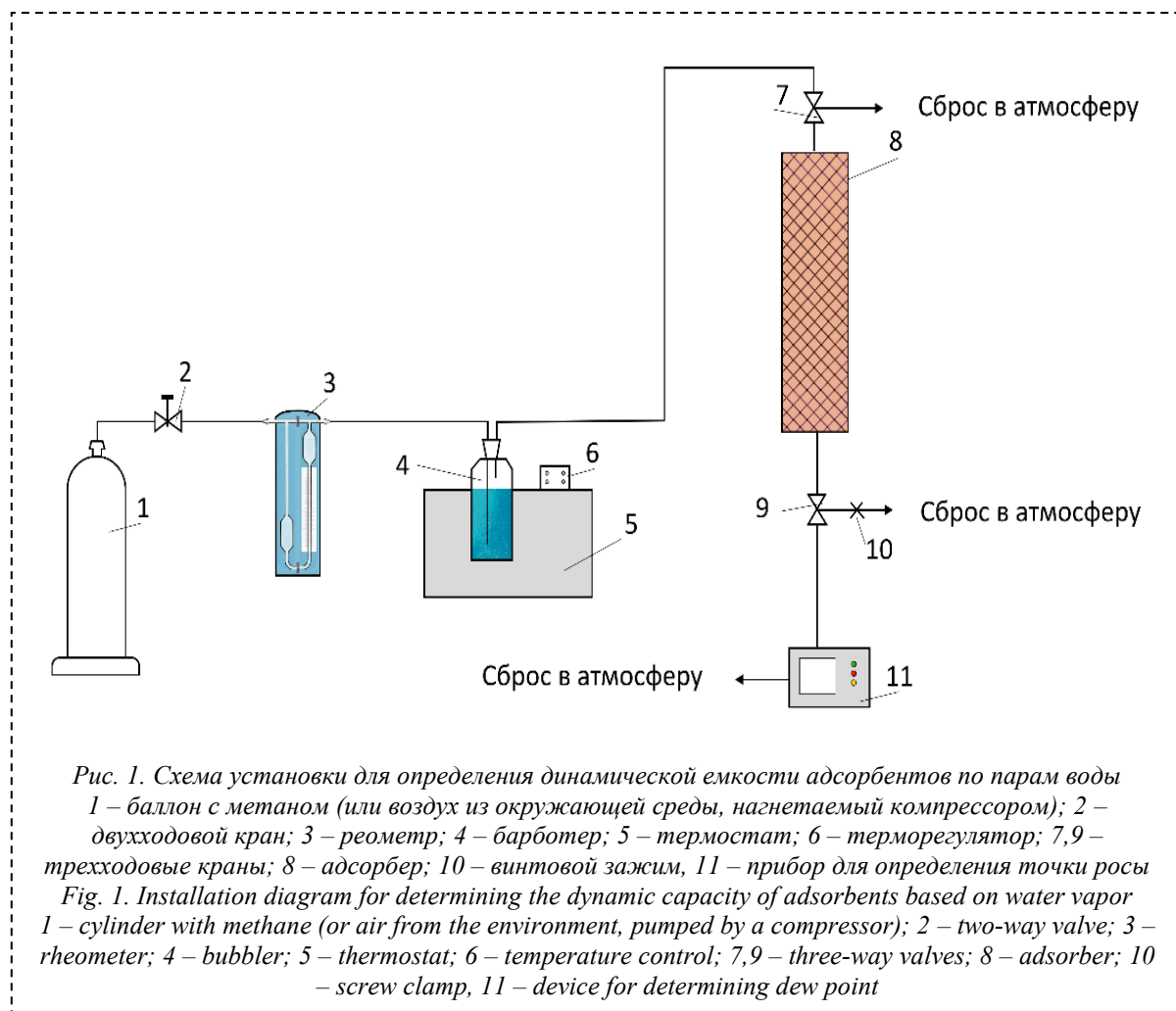
– *Высокое качество.* Несмотря на достаточно развитое отечественное производство

адсорбента, применяемого в процессе. При осушке газа перед производством СПГ в большинстве случаев используются цеолиты [9-13]. Динамическая активность адсорбентов является основным показателем, определяющим размеры адсорберов и продолжительность цикла адсорбции [14-18].

В данной статье авторы, руководствуясь принципами импортозамещения, представляют результаты сравнительных исследований динамической активности промышленных отечественных и зарубежных адсорбентов, применяемых в адсорбционной осушке газа.

Характеристики сырья и методика исследования

В качестве адсорбентов были выбраны отечественные промышленные цеолиты NaX-BC (без связующего) и NaA-BC и зарубежные молекулярные сита компании BASF 4A и 13X, которые используются в промышленности в осушке природного газа [8]. В Таблице 1 представлены физико-химические свойства данных адсорбентов.



Определение динамической емкости испытуемых образцов по парам воды проводили в адсорбере при следующих условиях: объемные расходы осушаемого газа 0,1; 0,17; 0,24; 0,43; 0,6 м³/ч, атмосферное давление, температура 5 – 50 °С; загрузка адсорбента ≈ 50 см³ (Рис. 1).

Поток воздуха (метана из баллона) пропускали через барботер, заполненный дистиллированной водой и термостатированный при температурах 5 °С, 25 °С и 50 °С, где воздух (метан) насыщался парами воды. Затем увлажненный поток подавался в адсорбер с образцом, выполненный из прозрачного стекла с водяной рубашкой для создания необходимой температуры адсорбции. Точку росы увлажненного газового потока (на входе в адсорбер) измеряли влагомером «Байкал» перед началом опыта и после его окончания. Направление газа при адсорбции – сверху вниз. В слое отрегенированного сорбента происходит осушка газового потока. После адсорбера часть осушенного газового потока постоянно поступала на влагомер для определения точки росы осушенного газа. С момента подачи газовой смеси в адсорбер регистрировалось время начала испытания.

Испытания прекращали при увеличении значения влагосодержания газа на выходе из адсорбера до точки росы по влаге минус 70 °С. При проведении исследования адсорбер до и после испытания взвешивали.

Динамическую адсорбционную активность адсорбента (А, % масс.) определяли по формуле:

$$A = \frac{G_a}{g_a} \cdot 100\%$$

где G_a – количество поглощенной влаги, г, g_a – количество адсорбента, г.

Исследования динамической адсорбционной активности адсорбентов в осушке увлажненного воздуха осуществляли при атмосферном давлении, в температурном интервале от 5 до 50 °С и объемных скоростях осушаемого газа от 2000 ч⁻¹ до 12500 ч⁻¹, а метана в температурном интервале от 5 до 50 °С и объемных скоростях осушаемого газа от 2000 ч⁻¹ до 5100 ч⁻¹.

Результаты исследований и обсуждение

Результаты, представленные в Таблице 2, показывают, что в интервале температур от 5 до 50 °С и объемных скоростях осушаемого газа от 2000 ч⁻¹ до 12500 ч⁻¹ NaA-БС проявляет наиболее высокую динамическую адсорбционную

Таблица 2. Влияние температуры и объемной скорости подачи воздуха на динамическую активность адсорбентов (% масс.)

Table 2. Effect of temperature and airflow rate on the dynamic activity of adsorbents (wt. %).

Адсорбенты	Температура, °C	Объемная скорость подачи воздуха, ч ⁻¹				
		2000	3600	5100	9000	12500
NaX-BC	5	22,71	20,64	18,68	17,55	17,16
	25	21,06	19,19	17,44	16,39	14,52
	50	18,73	17,16	15,64	14,74	13,73
13X	5	22,24	19,79	18,94	17,73	16,79
	25	20,31	18,59	17,66	16,51	13,91
	50	18,33	16,54	15,81	14,87	13,28
NaA-BC	5	23,11	21,12	19,18	18,05	17,68
	25	21,50	19,69	17,92	16,89	15,02
	50	19,23	17,66	16,14	15,25	14,23
4A	5	22,02	19,91	18,86	17,58	16,44
	25	20,43	18,21	16,28	15,86	14,16
	50	18,31	16,66	15,93	14,52	13,43

Таблица 3. Влияние температуры и объемной скорости подачи метана на динамическую активность адсорбентов (% масс.)

Table 3. Influence of temperature and volumetric flow rate of methane on the dynamic activity of adsorbents (wt. %)

Адсорбенты	Температура, °C	Объемная скорость подачи метана, ч ⁻¹		
		2000	3600	5100
NaX-BC	5	22,27	20,25	18,35
	25	20,66	18,91	17,13
13X	5	22,46	19,99	19,13
	25	20,32	18,78	17,84
NaA-BC	5	23,42	21,40	19,45
	25	21,78	19,95	18,19
4A	5	22,27	20,14	19,11
	25	20,70	18,51	16,44

активность в осушке воздуха, чем остальные адсорбенты. При этом можно отметить характерную зависимость для всех исследованных адсорбентов: повышение температуры адсорбции и увеличение объемной скорости осушаемого воздуха приводит к уменьшению динамической адсорбционной активности. Проведение осушки воздуха с использованием всех цеолитных адсорбентов во всем интервале температур и увеличением объемной скорости подачи воздуха с 2000 до 12500 ч⁻¹ приводит к снижению адсорбционной активности ~ в 1,1 – 1,3 раза.

Стоит отметить, что NaA-BC показывает большее значение динамической емкости во всем диапазоне температур и объемной скорости подачи воздуха в сравнении с другими адсорбентами и, в частности, с зарубежным аналогом 4A BASF. У 4A BASF при объемной скорости 2000 ч⁻¹, динамическая емкость меньше ~ на 5% по сравнению с NaA-BC, а при 12500 ч⁻¹ ~ на 7%.

Также были проведены исследования вышеуказанных адсорбентов в осушке метана. Исследование сравнительной динамической адсорбционной активности адсорбентов в

осушке метана проводили при атмосферном давлении, температуре 5 и 25°C и объемной скорости подачи увлажненного метана 2000, 3100 и 5100 ч⁻¹, результаты которых представлены в Таблице 3.

Анализируя результаты, представленные в Таблице 3, можно отметить, что в осушке метана динамическая активность молекулярного сита 13X увеличилась ~ на 1%, цеолита NaX-BC уменьшилась ~ на 2% по сравнению с динамической активностью в осушке воздуха, тогда как динамическая активность цеолитов 4A и NaA-BC увеличилась ~ на 1,2 – 1,4% по сравнению с динамической активностью в осушке воздуха.

Из экспериментальных данных следует отметить, что в осушке метана наибольшей динамической адсорбционной активностью обладает NaA-BC и незначительно меньшая сорбционная емкость отмечена для всех остальных цеолитных образцов.

В работе также была исследована стабильность динамической активности в 70 циклах адсорбция-регенерация в осушке воздуха по вышеизложенной методике. В Таблице 4 представлены сравнительные сорбционные

Таблица 4. Сорбционные свойства адсорбентов
Table 4. Sorption properties of adsorbents

Адсорбент	Номер цикла	Динамическая активность, % масс.	Адсорбент	Номер цикла	Динамическая активность, % масс.
NaX-BC	1	21,06	NaA-BC	1	21,50
	5	20,95		5	21,39
	10	20,85		10	21,29
	15	20,73		15	21,17
	30	20,68		30	21,03
	50	20,59		50	20,95
	70	20,52		70	20,89
13X BASF	1	20,31	4A	1	20,43
	5	20,01		5	20,33
	10	19,91		10	20,23
	15	19,80		15	20,17
	30	19,67		30	20,09
	50	19,55		50	20,02
	70	19,73		70	19,96

Таблица 5. Усредненные результаты показателей времени защитного действия
Table 5. Average results of protective action time indicators

Адсорбент	NaX-BC	13X	NaA-BC	4A
Усредненное значение времени защитного действия за 70 циклов, мин.	89	91	121	115

свойства адсорбентов при разных циклах адсорбция-регенерация при объемной скорости подачи воздуха 2000 ч⁻¹.

Из полученных данных следует, что с увеличением циклов адсорбция-регенерация у всех адсорбентов уменьшается динамическая активность. У всех адсорбентов за 70 циклов динамическая активность снижается ~ на 2 – 2,7%.

В Таблице 5 представлены усредненные результаты значений показателей времени защитного действия за 70 циклов адсорбция-регенерация в осушке воздуха.

Результаты проведенных исследований показывают, что максимальное (121 мин.) значение времени защитного действия слоя адсорбента имеют образцы сорбентов NaA-BC, а минимальное (89 мин.) – отмечено у цеолита NaX-BC.

Выводы

1. Установлено, что в интервале температур от 5 до 50°C и объемных скоростей осушаемого газа от 2000 ч⁻¹ до 12500 ч⁻¹ цеолит NaA-BC проявляет наиболее высокую динамическую адсорбционную активность в осушке воздуха и метана.

2. Показано, что с увеличением циклов адсорбция-регенерация у всех адсорбентов уменьшается динамическая активность ~ на 2 – 2,7%.

3. Установлено, что максимальное значение времени защитного действия слоя адсорбента имеет NaA-BC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Широкова Г. С., Елистратов М. В. Технологические задачи комплексной очистки природного газа для получения СПГ // Газовая промышленность. 2011. (Спецвыпуск). С. 11–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17256698&ysclid=lyal045mp6871833806>.
2. Аджиев А. Ю., Морев Н. П., Долинская Н. И. Отечественные цеолиты для глубокой осушки газа при производстве сжиженного природного газа // НефтеГазХимия. 2015. № 3. С. 34–38. URL: <https://www.elbrary.ru/item.asp?id=25611731&ysclid=lyal1716jy416551727>.
3. Производство, транспортировка, хранение и использование сжиженного природного газа // Газовая промышленность, 2011. (Спецвыпуск). URL: https://rusneb.ru/cataog/000200_000018_RU_NLR_Per_836424/?ysclid=lyal1uf1mh982513964.
4. Mokhatab S., Mak J. Y., Valappil J. V. Handbook of Liquefied Natural Gas. Oxford: Elsevier Inc., 2014. 624 p. URL: <https://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/778193802.pdf>.
5. Аджиев А. Ю., Пуртов П. А. Подготовка и переработка попутного нефтяного газа в России // Адсорбционная осушка ПНГ: В 2 ч. Ч. 1. 2014. 776 с. URL: https://rusneb.ru/cataog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012885514/?ysclid=lyal3aiq1p13407678.

6. Бекиров Т. М., Ланчаков Г. А. Технология обработки газа и конденсата. М. : Недра, 1999. 596 с. URL: <https://djvu.online/file/iLQ7CUVz8F9VV?ysclid=lyal3y2lpc590409472>.
7. Технология переработки природного газа и газоконденсата: Справочник: в 2 ч. М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. Ч. 1. 517 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/24312>.
8. Melnikov V. B., Fedorova E. B., Gafarova E. B. Comparative evaluation of adsorbents for natural gas dehydration at liquefied natural gas plant // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2020. №1. Pp. 31–35. DOI 10.1007/s10553-020-01107-9.
9. Robson H. Verified synthesis of zeolitic materials // Amsterdam: Elsevier. 2001. P. 272. URL: <https://shop.elsevier.com/books/verified-synthesis-of-zeolitic-materials/robson/978-0-444-50703-7/>.
10. Байрамова А. С. Исследование процесса адсорбционного разделения цеолитами газовой смеси // Международный научно-практический журнал «Интеграция наук». 2018. № 3(18). С. 13–15. URL: https://empria.ru/d/vypusk_318_1.pdf?ysclid=lyal812cun899599195.
11. Alekberov Y. Z., Khalilov R. Z., Ismailova X. G. Research and Application of Natural Zeolite in the Processes of Gas Purification and Drying // SOCAR Proceedings Special Issue 2021. № 2. Pp. 016–021. URL: socarproceeding2021.pdf.
12. Pfenninger A., Karge H. G., Weitkamp J. Manufacture and use of zeolites for adsorption processes // Molecular Sieves – Science and Technology, Structures and Structure Determination. 1999. № 2. Pp. 163–198. DOI: 10.1007/3-540-69749-7_6.
13. Gorbach A, Stegmair M., Eigenberger G. Measurement and modeling of water vapor adsorption on zeolite 4A-equilibria and kinetics // Adsorption. 2004. № 10. Pp. 29–49. DOI: 10.1023/B:ADSO.0000024033.60103.ff.
14. Мельников В. Б., Федорова Е. Б., Макарова Н. П., Гафарова Э. Б. Исследование динамической адсорбционной активности силикагелей в осушке газов // Нефтепромышленное дело. 2022. № 5(641). С. 51–53. DOI: 10.33285/0207-2351-2022-5(641)-51-53.
15. Фенелонов В. Б. О кинетике и динамике сорбции газов и паров на синтетических цеолитах // Цеолиты, их синтез, свойства и применение: материалы 2-го Всесоюзного совещания по цеолитам: сб. докл. 1965. С. 345–349. URL: <https://djvu.online/file/C8xKB8oeSzyh9?ysclid=lyalampmd7378241645>.
16. Сергунин А. С., Симаненков С. И., Гатапова Н. Ц. Исследование динамики адсорбции и десорбции паров воды активным оксидом алюминия и цеолита NaX // Вестник ТГТУ. 2012. Т. 18. № 3. С. 664–671. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?ysclid=lybixvrizj850446076&id=18036301>
17. Мельников В. Б. Промысловый сбор и переработка газа и газового конденсата. Учебник. М. : Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина? 2017. 464 с. URL: <https://elbrary.ru/item.asp?ysclid=lyb73gsy6j462275903&edn=yqqyp>.
18. Мухамбетова О. А., Кулаков А. В., Пивоварова Н. А., Пивоваров А. Т. Анализ влагосодержания осушенного природного газа // Научные труды АстаханьНИПИгаза, 2004. № 6. С. 28–31.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Гафарова Элиза Багаутдиновна, старший преподаватель, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1); 0000-0002-9750-0014; e-mail: gafarovaeliza@mail.ru

Мельников Вячеслав Борисович, доктор химических наук, профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1); e-mail: v.mel@mail.ru

Федорова Елена Борисовна, доктор технических наук, доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1); e-mail: fedorova.e@gubkin.ru

Макарова Наталья Петровна, кандидат химических наук, доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1); e-mail: natalyamakarova@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Гафарова Элиза Багаутдиновна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, проведение исследования, обработка результатов, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Мельников Вячеслав Борисович – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Федорова Елена Борисовна – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования.

Макарова Наталья Петровна – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

COMPARATIVE STUDIES OF DYNAMIC ADSORPTION ACTIVITY OF DOMESTIC AND FOREIGN ZEOLITES

Eliza B. Gafarova *, Vyacheslav B. Melnikov,
Elena B. Fedorova, Natalya P. Makarova

Gubkin University

for correspondence: gafarovaeliza@mail.ru



Article info

Received:

08 July 2024

Accepted for publication:

29 September 2024

Accepted:

10 October 2024

Published:

24 October 2024

Keywords: liquefied natural gas, adsorption drying, zeolites, dynamic activity, gas moisture content, import substitution.

Abstract.

The article presents the results of comparative studies of the dynamic adsorption activity of domestic and foreign industrial zeolite-type adsorbents for deep drying of natural gas in the production of LNG and other processes requiring a similar degree of drying. Domestic and foreign zeolite-type adsorbents of the NaX-BS, 13X (BASF), NaA-BS and 4A (BASF) brands were studied under dynamic gas drying conditions. The gas used was methane and air saturated with moisture (as a model gas). As a result of the studies, it was found that in the studied temperature range and volumetric velocities of the gas being dried, NaA-BS exhibits the highest dynamic adsorption activity in drying air and methane. The stability of the dynamic adsorption activity of adsorbents was studied in 70 adsorption-regeneration cycles in air-drying. It has been established that with increasing adsorption-regeneration cycles, the dynamic activity of all adsorbents decreases. It has been established that NaA-BS has the maximum value of the protective action time of the adsorbent layer.

The results obtained by the authors show that domestically produced zeolites are not inferior to their foreign analogues in terms of adsorption characteristics, and are somewhat superior to them. The research results make it possible to use domestic adsorbents for the purpose of import substitution in the deep drying of natural gas in the production of LNG and other processes requiring a similar degree of drying.

For citation: Gafarova E.B., Melnikov V.B., Fedorova E.B., Makarova N.P. Comparative studies of dynamic adsorption activity of domestic and foreign zeolites. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 5(165):65-73. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-65-73, EDN: QPSJJP

REFERENCES

1. Shirokova G.S., Elistratov M.V. Technological problems of complex purification of natural gas to obtain LNG. *Gazovaya promyshlennost'* = Gas industry. 2011; (Special issue):11–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17256698&ysclid=lyal045mp6871833806>.

2. Adzhiev A.Yu. Moreva N.P., Dolinskaya N.I. Domestic zeolites for deep gas drying in the production of liquefied natural gas. *NefteGazokhimiya* = Petrochemicals. 2015; (3):34–38. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25611731&ysclid=lyal17l6jy416551727>. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Production, transportation, storage and use of liquefied natural gas. *Gazovaya promyshlennost'* = Gas

industry. 2011. (Special issue). Available at: https://rusneb.ru/cataog/000200_000018_RU_NLR_Per_836424/?ysclid=lyal1uf1mh982513964. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Mokhatab S., Mak J.Y., Valappil J.V. Handbook of Liquefied Natural Gas. Oxford: Elsevier Inc., 2014. 624 p. Available at: <https://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/778193802.pdf>.

5. Adzhiev A.Yu., Purtov P.A. Preparation and processing of associated petroleum gas in Russia: In 2 parts. 2014. 776 p. Available at: https://rusneb.ru/cataog/000200_000018_RU_NLR_BI_BL_A_012885514/?ysclid=lyal3aiq1p13407678.

6. Bekirov T.M., Lanchakov G.A. Gas and condensate processing technology. M.: Nedra; 1999. 596 p. Available at: <https://djvu.online/file/iLQ7CUVz8F9VV?ysclid=lyal3y2lpc590409472>.

7. Technology for processing natural gas and gas condensate: Handbook: 2 h. M.: Nedra-Business Center LLC; 2002. Part 1. 517 p. Available at: <https://www.geokniga.org/books/24312>.

8. Melnikov V.B., Fedorova E.B., Gafarova E.B. Comparative evaluation of adsorbents for natural gas dehydration at liquefied natural gas plant. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020; 1:31–35. (In Eng.) DOI 10.1007/s10553-020-01107-9.

9. Robson H. Verified synthesis of zeolitic materials. Amsterdam: Elsevier. 2001. 272 p. Available at: <https://shop.elsevier.com/books/verified-synthesis-of-zeolitic-materials/robson/978-0-444-50703-7/>.

10. Bayramova A.S. Study of the process of adsorption separation of a gas mixture by zeolites. *Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij zhurnal «Integraciya nauk = International scientific and practical journal “Integration of Sciences”*. 2018; 3(18):13–15. Available at: https://empria.ru/d/vypusk_318_1.pdf?ysclid=lyal8l2cu n899599195. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Alekberov Y.Z., Khalilov R.Z., Ismailova X.G. Research and Application of Natural Zeolite in the Processes of Gas Purification and Drying. *SOCAR*

Proceedings Special Issue. 2021; 2:016–021. Available at: socarproceeding2021.pdf. (In Eng.)

12. Pfenninger A., Karge H.G., Weitkamp J. Manufacture and use of zeolites for adsorption processes. *Molecular Sieves – Science and Technology, Structures and Structure Determination*. 1999; 2:163–198. (In Eng.) doi:10.1007/3-540-69749-7_6.

13. Gorbach A., Stegmair M., Eigenberger G. Measurement and modeling of water vapor adsorption on zeolite 4A-equilibria and kinetics. *Adsorption*. 2004; 10:29–49.

DOI: 10.1023/B:ADSO.0000024033.60103.ff. (In Eng.)

14. Melnikov V.B., Fedorova E.B., Makarova N.P., Gafarova E.B. Study of the dynamic adsorption activity of silica gels in gas drying. *Neftepromyslovoe delo = Oilfield Business*. 2022; 5(641):51–53. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.33285/0207-2351-2022-5(641)-51-53.

15. Fenelonov V.B. On the kinetics and dynamics of sorption of gases and vapors on synthetic zeolites. *Zeolites, their synthesis, properties and application: materials of the 2nd All-Union meeting on zeolites: collection*. 1965. Pp. 345–349. Available at: <https://djvu.online/file/C8xKB8oeSzyh9?ysclid=lyalap mtd7378241645>.

16. Sergunin A.S., Simanenkov S.I., Gatapova N.Ts. Study of the dynamics of adsorption and desorption of water vapor by active aluminum oxide and NaX zeolite. *Vestnik TSTU*. 2012; 18(3):664–671. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?ysclid=lybixvrizj850446076 &id=18036301>. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Melnikov V.B. Field collection and processing of gas and gas condensate. Textbook. M.: Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkina; 2017. 464 p. Available at: <https://elbrary.ru/item.asp?ysclid=lyb73gsy6j462275903 &edn=yqqyp>. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Mukhambetova O.A., Kulakov A.V., Pivovarov N.A., Pivovarov A.T. Analysis of moisture content of dried natural gas. *Scientific works of AstakhanNIPigaz*. 2004; 6:28–31. (In Russ., abstract in Eng.)

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Eliza B. Gafarova, Senior Lecturer, National University of Oil and Gas "Gubkin University" (119991 Moscow, Leninsky prospect, 65, building 1); 0000-0002-9750-0014; e-mail: gafarovaeliza@mail.ru

Vyacheslav B. Melnikov, Dr. Sc. in Chemistry, Professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University" (119991 Moscow, Leninsky prospect, 65, building 1); v.mel@mail.ru

Elena B. Fedorova, Dk. Sc. in Engineering, associate professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University" (119991 Moscow, Leninsky prospect, 65, building 1); e-mail: fedorova.e@gubkin.ru

Natalya P. Makarova, C. Sc. in Chemistry, associate professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University" (119991 Moscow, Leninsky prospect, 65, building 1); e-mail: natalyamakarova@mail.ru

Contribution of the authors:

Eliza B. Gafarova – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualization of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Vyacheslav B. Melnikov – research problem statement; reviewing the relevant literature; conceptualization of research; drawing the conclusions; writing the text.

Elena B. Fedorova – reviewing the relevant literature; conceptualization of research

Natalya P. Makarova – reviewing the relevant literature; conceptualization of research.

All authors have read and approved the final manuscript.

