

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОЛИМЕРЫ

УДК 541.64:547.514

СИНТЕЗ И ПОРИСТАЯ СТРУКТУРА АДДИТИВНОГО ПОЛИМЕРА НА ОСНОВЕ ДИЦИКЛОПЕНТАДИЕНА

© 2019 г. А. И. Возняк^а, Е. В. Бермешева^{а,б}, Н. Н. Гаврилова^с, М. В. Бермешев^{а,с,*}

^аИнститут нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук
119991 Москва, Ленинский пр., 29, Россия

^бПервый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова
Министерства здравоохранения Российской Федерации
119991 Москва, Трубецкая ул., 8 стр. 2, Россия

^сРоссийский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева
125047 Москва, Миусская пл., 9, Россия

* e-mail: bmv@ips.ac.ru

Поступила в редакцию 26.04.2019 г.

После доработки 03.06.2019 г.

Принята к публикации 17.06.2019 г.

Предложена простая двухстадийная схема синтеза нового пористого полимерного материала на основе дициклопентадиена — промышленного продукта и одного из наиболее доступных производных норборнена. Селективная аддитивная полимеризация дициклопентадиена, бифункционального мономера, протекающая с раскрытием только эндоциклической двойной связи, и последующее гидрирование синтезированного продукта позволили получить насыщенный полимерный материал с высокой удельной поверхностью (425 м²/г). Представлены результаты по изучению пористой структуры гидрированного аддитивного поли(дициклопентадиена) с использованием методов низкотемпературной адсорбции/десорбции азота и рентгенофазового анализа в сравнении с аналогичным полимером до гидрирования. Показано, что полученный полимерный материал обладает высокой термической стабильностью.

DOI: 10.1134/S230811391905019X

ВВЕДЕНИЕ

Пористые соединения являются привлекательными материалами для хранения газов [1–3], создания гетерогенных катализаторов [4, 5], газоразделительных мембран [6–9], высокоэффективных сорбентов [10–12] и т.д. Одни из наиболее известных пористых материалов — кристаллические цеолиты и аморфные активированные угли. Активное развитие современной химической технологии и новые требования к таким материалам делают актуальным поиск и создание новых пористых материалов, особенно на основе промышленно доступных соединений. За последние десятилетия был разработан широкий спектр пористых материалов с различными свойствами [3, 6, 13]. Например, были синтезированы большие серии металлоорганических каркасов и ковалентно-органических каркасов, которые, как правило, кристаллические и обладают узким распределением пор по размерам, являясь, таким образом, органическими аналогами цеолитов [14, 15]. Интересными примерами аморфных пористых материалов служат линейные полимеры с жесткими основными цепями, такие как полиацетилены [9,

16], полимеры с внутренней микропористостью [6, 17], термически перегруппированные полимеры [8, 18], полинорборнены [13, 19, 20] и сетчатые сшитые полимеры, например полимеры с внутренней микропористостью [21], ароматические сопряженные микропористые полимеры [22], полиолефины [23]. Эти полимеры обладают большой площадью удельной поверхности и представляют интерес в качестве мембранных материалов или материалов для хранения газов. Благодаря широким возможностям органической химии и химии высокомолекулярных соединений создание пористых материалов на основе полимеров обладает большим потенциалом и представляется перспективным направлением. Среди различных классов полимеров для создания пористых материалов полинорборнены представляют особый интерес из-за возможности синтеза широкого круга мономеров с закономерно изменяемым строением [24–27] и их способности вовлекаться в полимеризацию по нескольким направлениям [7, 28–30]. Ранее была исследована пористая структура двух групп аддитивных полинорборненов. В частности, было показано, что

полинорборнены с объемными боковыми группами Me_3Si являются микропористыми полимерами, имеют площадь поверхности по БЭТ от 550 до 780 $\text{м}^2/\text{г}$ [13, 19, 31] и представляют интерес в качестве мембранных материалов для газоразделения углеводородов [32–34] и выделения CO_2 из промышленных газовых потоков [34], стационарных фаз для газожидкостной хроматографии [35, 36]. Позже было показано, что аддитивные гомополимеры на основе димера и тримера норборнадиена-2,5 также обладают большой удельной поверхностью (до 1000 $\text{м}^2/\text{г}$) [37], и варьированием природы катализатора полимеризации можно направленно создавать из одного мономера микроили мезопористые полимеры. Однако получение таких пористых материалов требовало синтеза исходных мономеров. В настоящей работе мы предлагаем более простой подход к пористым материалам на основе норборненов с помощью аддитивной полимеризации дициклопентадиена, побочного продукта пиролиза нефтяных фракций, сопровождаемой стадией гидрирования. Предложенный подход может обеспечить более простое получение пористых органических материалов для различных областей применения на основе полупродуктов нефтехимии, особенно в качестве материалов для хранения газов, и наполнителей для модификаций газоразделительных композитных мембран.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

n-Тозилгидразин получали по методике [38]. *o*-Ксилол (“AcrosOrganics”) ($T_{\text{кип}} = 144\text{--}145^\circ\text{C}$) кипятили над Na в течение 5 ч и перегоняли в аргоне.

Калориметрические исследования выполняли на дифференциальном сканирующем калориметре фирмы “Mettler” марки TA-4000 с ячейкой DSC-30 при скорости повышения температуры 20 град/мин в атмосфере аргона. Термогравиметрический анализ проводили с помощью прибора “Perkin-Elmer TGA-7” при скорости повышения температуры 10 град/мин.

Для регистрации твердофазных спектров ЯМР на ядрах ^{13}C высокого разрешения применяли технику переноса поляризации с одновременным вращением образца под “магическим” углом (CP/MAS). Рабочая частота на ядрах ^{13}C составляла 125.5 МГц. Спектры регистрировали на приборе “Varian Unity Inova AS500”, снабженном твердофазным ВМУ-датчиком с внешним диаметром ротора 3.2 мм. Ротор с образцом полимера вращался с частотой 15 кГц. Время 90° -импульса, контакта и промежутка между импульсами составили 3.5 мкс, 2 мс и 2 с соответственно. В качестве вторичного стандарта для калибровки оси химического сдвига ^{13}C использовали сигнал кар-

бонильного углерода в глицине, положение которого в спектре соответствовало 176.03 м.д.

Рентгенографические измерения осуществляли на дифрактометре ДРОН-3М в режиме съемки “на прохождение” (асимметричный, фокусирующий на детектор, кварцевый монохроматор на первичном пучке). Использовали CuK_α -излучение ($\lambda = 0.154$ нм). Сканирование дифракционной картины выполняли в “пошаговом режиме” с шагом $\Delta 2\theta = 0.04^\circ$ и временем накопления $\tau = 10$ с.

Низкотемпературную адсорбцию азота проводили с использованием автоматического анализатора “Micromeritics Gemini VI Surface Area Analyzer”. Образцы свежееосажденных высушенных полимеров в виде порошка дегазировали при температуре 40–80 $^\circ\text{C}$ до остаточного давления $(25\text{--}50) \times 10^{-3}$ мм рт. ст. в течение 10 ч [39]. Полученные результаты обрабатывали в программном пакете Gemini VII версия 1.03. Воспроизводимость результатов проверяли дважды.

Удельную поверхность образцов рассчитывали согласно методу БЭТ. В расчетах использовали интервал относительных давлений 0.05–0.18. При больших давлениях наблюдалось отклонение от линейности. Удельную поверхность микропор оценивали с использованием *t*-метода Де-Бура. Распределение мезопор по размерам рассчитывали методом Баррета–Джойнера–Халенда. Объем микропор определяли на основании уравнения Дубинина–Радушкевича. Для оценки распределения микропор по размерам использовали метод Хорвата–Кавазое.

Полимеризацию проводили в атмосфере сухого аргона. Аддитивный полимер на основе дициклопентадиена синтезировали как описано ранее [20].

Гидрирование аддитивного полидициклопентадиена

В двугорлую колбу объемом 50 мл, заполненную аргоном, снабженную магнитной мешалкой и обратным холодильником, загружали 0.184 г поли(дициклопентадиена), 1.780 г (9.56 ммоль) *n*-тозилгидразина и 20 мл абсолютного *o*-ксилола. Смесь кипятили в токе аргона в течение 15 ч. Затем полимер отфильтровывали, промывали этиловым спиртом и очищали в экстракторе Сокслета этанолом в течение 10 ч. Сушили в вакууме при 80 $^\circ\text{C}$ до постоянной массы. Выход 71%.

ЯМР ^{13}C (CP-MAS, м. д.): 60.0–21.0 м.

ИК (ATR, см^{-1}): 2939, 2874, 1467, 1450, 1279, 1177.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дициклопентадиен (ДЦПД) является одним из наиболее доступных производных норборне-

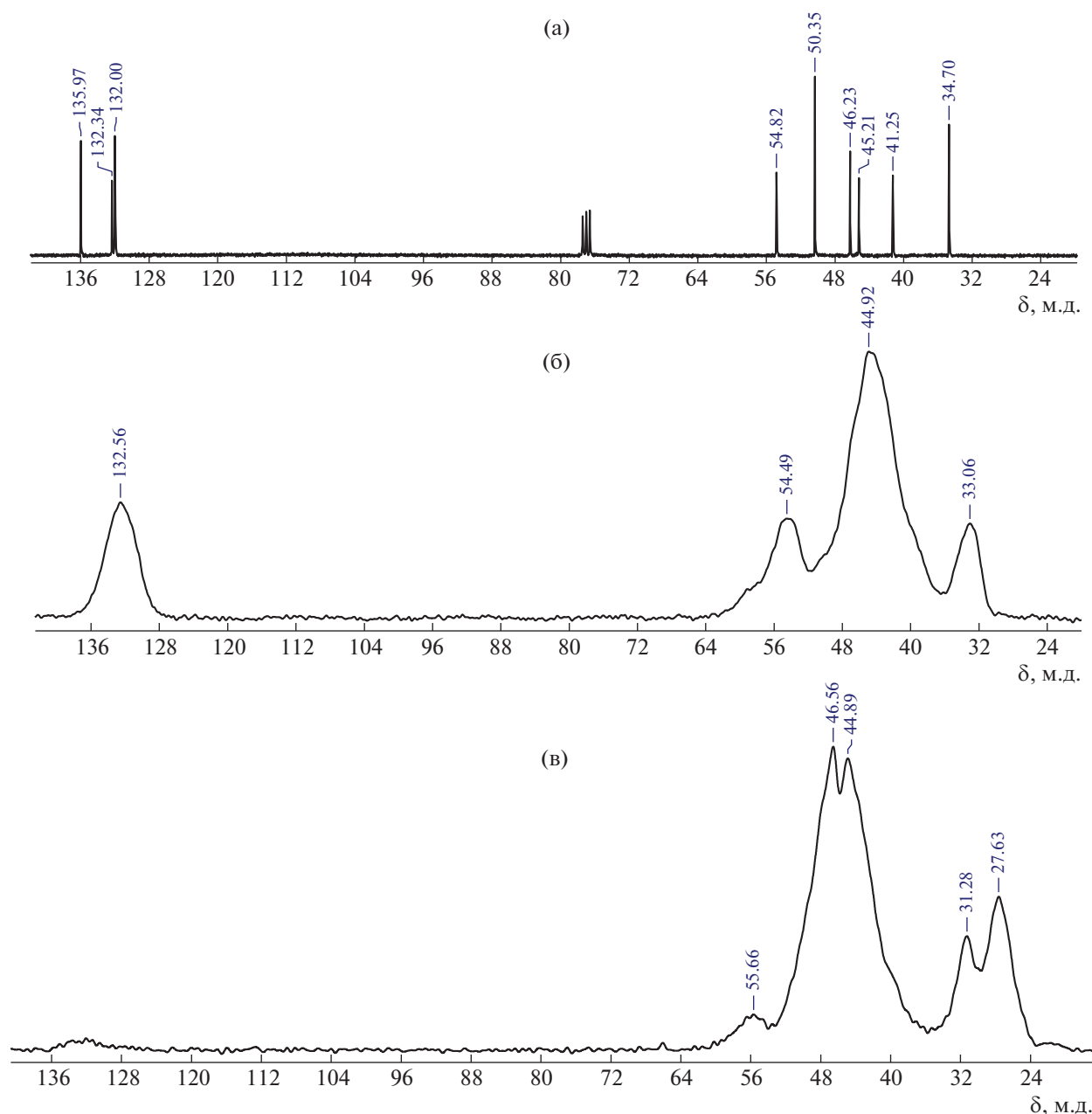
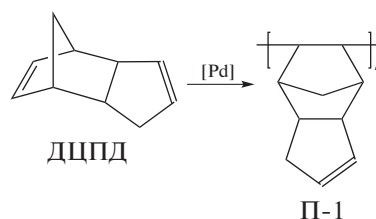


Рис. 1. Спектр ЯМР ^{13}C дидициклопентадиена (CDCl_3) (а), ^{13}C CP-MAS спектры П-1 (б) и П-2 (в).

на. Он содержит две двойные связи, способные вовлекаться в полимеризацию. Долгое время аддитивная полимеризация ДЦПД оставалась мало изученным процессом [7]. Относительно недавно были выделены кристаллические олигомеры ДЦПД и установлена микроструктура получаемых полимеров [40, 41]. При попытке синтеза высокомолекулярных полимеров на различных каталитических системах образовывались, как правило, нерастворимые продукты [20, 42]. Анализ полученных полимеров методами ЯМР- и ИК-спектроскопии позволил установить, что полимеризация протекала селективно с вовлечением

норборненовой двойной связи, в то время как циклопентеновая двойная связь оставалась незатронутой [20]. В данной работе аддитивный полидидициклопентадиен (П-1) был синтезирован в аналогичных условиях:



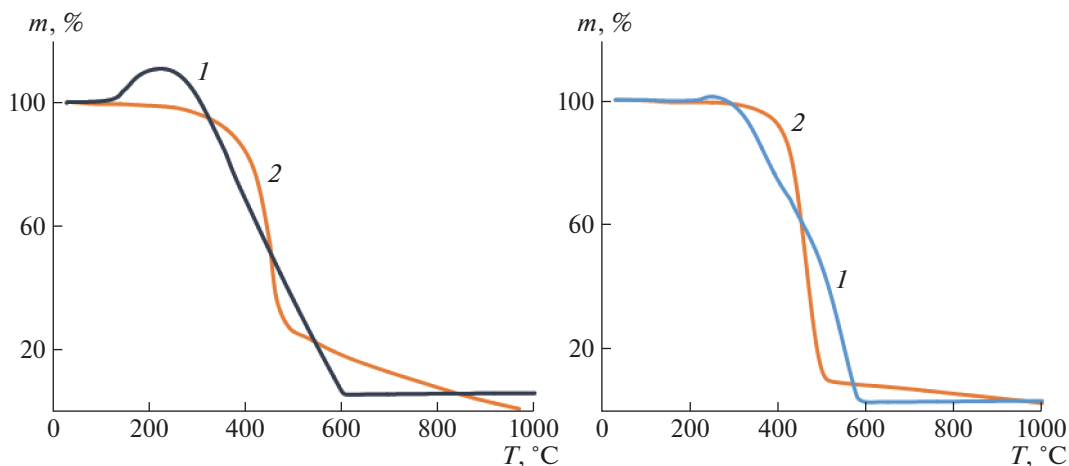
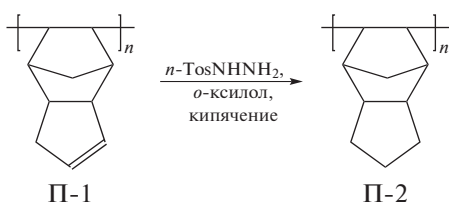


Рис. 2. ТГА-кривые П-1 (а) и П-2 (б) на воздухе (1) и в аргоне (2).

Полученный полимер далее был успешно прогидрирован в кипящем ксилоле с использованием *n*-тозилгидразина как источника водорода



Несмотря на то, что гидрирование протекало в гетерофазной системе, согласно данным твердотельной ЯМР-спектроскопии выделенный продукт (П-2) практически не содержал двойных связей (рис. 1). Используемая методика обладает существенными преимуществами для гидрирования полимеров — в полимере после гидрирования не остается металла и не требуется дополнительных

трудоемких стадий очистки от остатков каталитической системы.

Синтезированный П-2 является стеклообразным полимером с температурой стеклования, близкой к температуре разложения полимера или превышающей ее. Термическая стабильность П-1 и П-2 в инертной атмосфере очень высокая (>300°C) (рис. 2). В то же время в атмосфере воздуха стабильность этих двух полимеров сильно различается. Так, на ТГА-кривой П-1 на воздухе наблюдается увеличение массы в диапазоне 150–300°C, обусловленное окислением двойных связей полимера. Увеличение массы на кривой ТГА гидрированного полимера (П-2) практически отсутствует.

По данным рентгенофазового анализа, гидрированный полимер, как и его ненасыщенный предшественник аморфный (рис. 3). Его дифрактограмма представлена двумя широкими пиками. Это позволяет сделать предположение, что полимер не является кристаллическим, хотя определенная степень упорядоченности упаковки полимерных цепей наблюдается. Интересно, что после гидрирования межплоскостные расстояния *d* практически не изменились (табл. 1) и совпадают с соответствующими величинами для П-1. Значения межплоскостных расстояний для П-2 существенно больше, чем для незамещенного аддитивного полинорборнена (ПНБ). Это свидетельствует о более рыхлой упаковке полимерных цепей и большем свободном в П-2 по сравнению с ПНБ. Возможной причиной увеличения межплоскостных расстояний при переходе от ПНБ к П-2 является невозможность образования плотной упаковки макромолекул из-за наличия объемного бокового циклического заместителя в П-2. Это косвенно подтверждается близким характером дифрактограмм и соответственно одинаковыми межплоскостными расстояниями для П-1 и П-2.

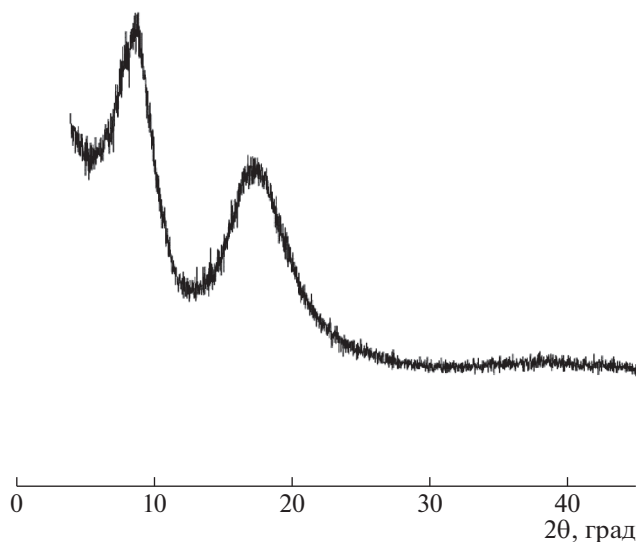
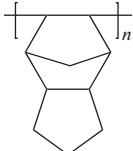
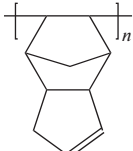
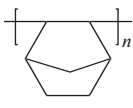


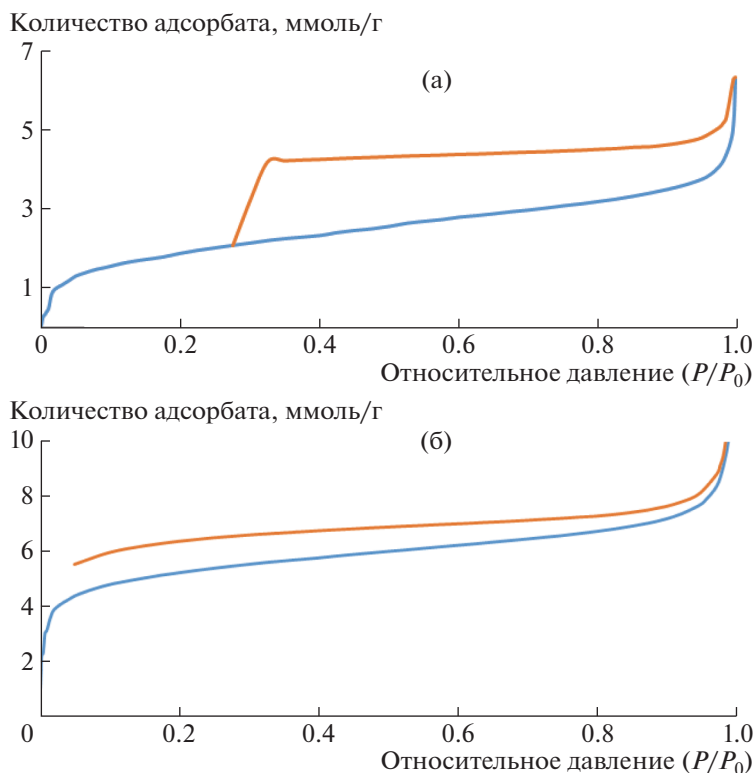
Рис. 3. Дифрактограмма полимера П-2.

Таблица 1. Физико-химические характеристики полимеров на основе ДЦПД в сравнении с аналогичными параметрами для аддитивного полинорборнена

Полимер	$(2\theta)_1$, град	d_1 , Å	$(2\theta)_2$, град	d_2 , Å	Литература
 П-2	8.7	10.3	17.3	5.2	Настоящая работа
 П-1	8.6	10.3	17.2	5.2	[20]
 ПНБ	10.0	8.8	18.5	4.7	[43]

Пористая структура и распределение свободного объема в синтезированном П-2 были исследованы методом низкотемпературной адсорбции–десорбции азота (рис. 4, 5; табл. 2). Полу-

ченная изотерма адсорбции относится к IV типу по классификации Брунауэра, которая характеризуется протеканием полимолекулярной адсорбции с последующей капиллярной конденса-

**Рис. 4.** Изотермы адсорбции/десорбции полимеров П-1 (а) и П-2 (б).

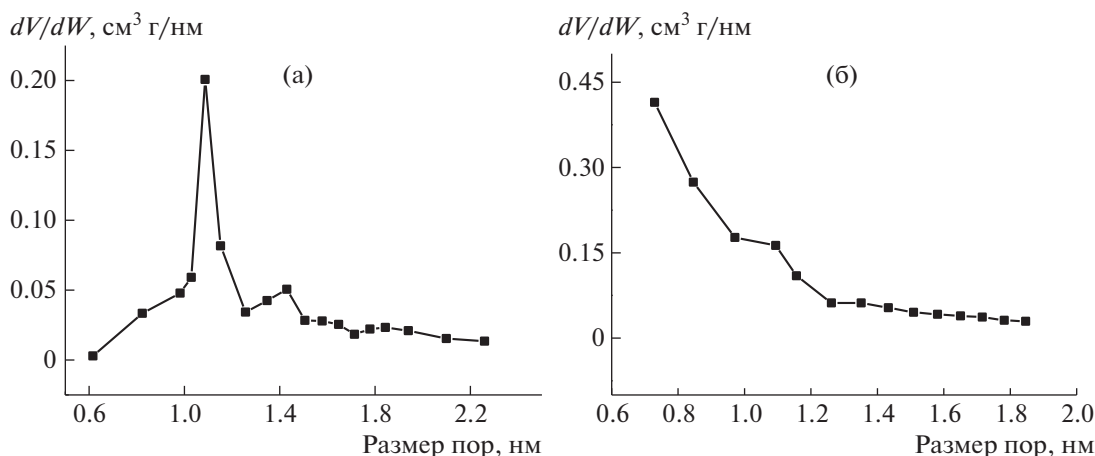


Рис. 5. Распределение микропор по размерам полимеров П-1 (а) и П-2 (б).

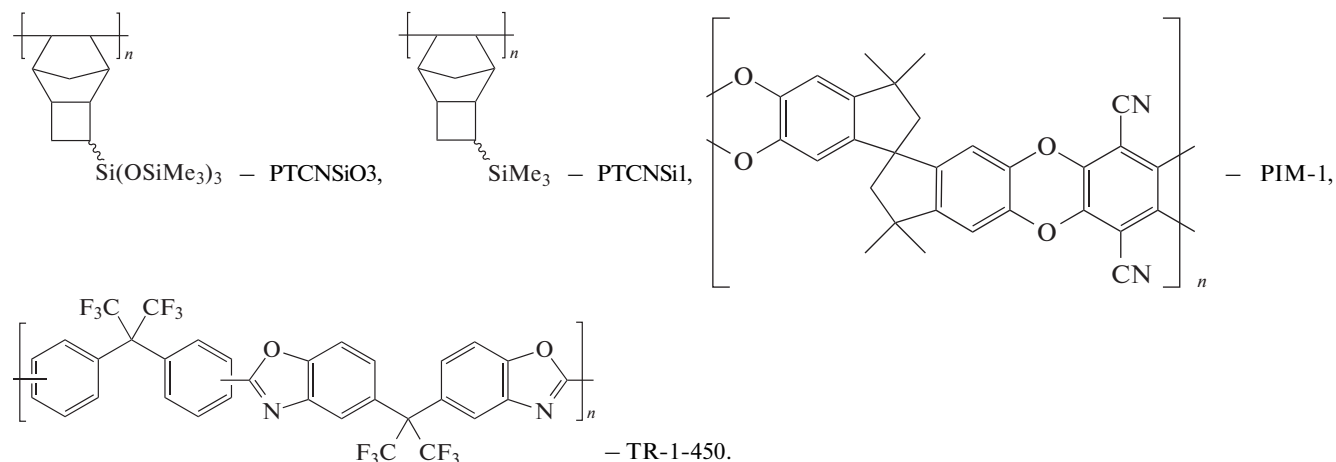
цией в порах. Форма петли гистерезиса относится к типу Н3, что соответствует щелевидной форме пор. На начальном участке изотермы наблюдается резкий скачок величины адсорбции, свидетельствующий о присутствии микропор в образце. Стоит отметить одну особенность полученной изотермы адсорбции – наличие петли гистерезиса в области низких давлений. Данный факт в

случае узких щелевых пор может быть объяснен тем, что при десорбции происходит разблокирование поверхности. На основании результатов эксперимента были рассчитаны основные характеристики пористой структуры этого материала: удельная поверхность, распределение пор по размерам, объем пор (табл. 2, рис. 4, 5).

Таблица 2. Физико-химические характеристики полимеров на основе DCPD в сравнении с некоторыми пористыми стеклообразными полимерами

Полимер	Удельная поверхность, м ² /г (БЭТ)	Удельная поверхность микропор, м ² /г (<i>t</i> -метод)	Суммарный объем пор, см ³ /г	Объем микропор, см ³ /г (метод Дубинина–Радужкевича)	Объем микропор, см ³ /г (<i>t</i> -метод)
П-1 [20]	155	10	0.18	0.077	0.001
П-2	425	216	0.39	0.203	0.090
PTCNSiO ₃ [13]	390	81	0.47	0.161	0.035
PTCNSi1 [13]	610	184	0.79	0.244	0.078
PIM-1 [44, 45]	720–830	–	0.78	–	–
TR-1-450 [46]	510	–	–	–	–

Примечание. Структурные формулы полимеров:



Из представленных в табл. 2 данных видно, что гидрирование приводит к существенному возрастанию удельной поверхности и объема пор по сравнению с П-1. Так, если П-1 представляет собой мезопористый материал, то П-2 является уже микропористым. Удельная поверхность этого полимера сопоставима с удельной поверхностью других хорошо известных и активно изучаемых микропористых полимеров, например, полимер с внутренней микропористостью (PIM-1) и кремнийсодержащие полиноборнаты (PTCNSi1, PTCNSiO3). Принимая во внимание препаративную доступность П-2, можно рассматривать указанный материал как новый доступный микропористый полимер, представляющий интерес для хранения газов и создания композиционных материалов на его основе для мембранного газоразделения.

Интересно, что после гидрирования изменился не только объем пор, но и их средний размер. Например, до гидрирования для П-1 средний размер микропор составлял 11 Å, в то же время в П-2 размеры микропор существенно меньше (около 6 Å, рис. 5). Более узкие поры и увеличенная удельная поверхность могут обеспечить необычный одновременный рост селективности разделения (зависит от размера микропор) и проницаемости газов (определяется в том числе свободным объемом) через полимерные материалы, содержащие П-2 в качестве наполнителя. Увеличение количества микропор при переходе от П-1 к П-2 может быть связано с тем, что в П-2 конформационная подвижность молекул меньше и, таким образом, цепи не могут образовывать плотную упаковку полимера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирован насыщенный аддитивный полимер на основе промышленно доступного дициклопентадиена. Полученный полимер представляет собой аморфный, стеклообразный и нерастворимый полимер. Он обладает высокой термической стабильностью в отличие от своего предшественника — аддитивного полимера на основе дициклопентадиена. Исследование пористой структуры синтезированного насыщенного полимера позволило установить, что он является микропористым материалом, а его удельная поверхность существенно превышает соответствующую величину для негидрированного аддитивного полидициклопентадиена. Данный полимер представляет интерес как материал для хранения газов и в качестве наполнителя для создания композиционных полимерных материалов с высокой и селективной газопроницаемостью.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИНХС РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McKeown N.B., Gahnem B., Msayib K.J., Budd P.M., Tattershall C.E., Mahmood K., Tan S., Book D., Langmi H.W., Walton A.* // *Angew. Chem.* 2006. V. 118. № 11. P. 1836.
2. *Li B., Wen H.-M., Zhou W., Chen B.* // *J. Phys. Chem. Lett.* 2014. V. 5. № 20. P. 3468.
3. *Morris R.E., Wheatley P.S.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2008. V. 47. № 27. P. 4966.
4. *Mackintosh H.J., Budd P.M., McKeown N.B.* // *J. Mater. Chem.* 2008. V. 18. № 5. P. 573.
5. *Welbes L.L., Scarrow R.C., Borovik A.S.* // *Chem. Commun.* 2004. V. № 22. P. 2544.
6. *Low Z.-X., Budd P.M., McKeown N.B., Patterson D.A.* // *Chem. Rev.* 2018. V. 118. № 12. P. 5871.
7. *Bermeshev M.V., Chapala P.P.* // *Prog. Polym. Sci.* 2018. V. 84. № P. 1.
8. *Kim S., Lee Y.M.* // *Prog. Polym. Sci.* 2015. V. 43. P. 1.
9. *Nagai K., Masuda T., Nakagawa T., Freeman B.D., Pinnau I.* // *Prog. Polym. Sci.* 2001. V. 26. № P. 721.
10. *Budd P.M., Ghanem B., Msayib K., McKeown N.B., Tattershall C.* // *J. Mater. Chem.* 2003. V. 13. № 11. P. 2721.
11. *Adebajo M.O., Frost R.L., Klopogge J.T., Carmody O., Kokot S.* // *J. Porous Mater.* 2003. V. 10. № 3. P. 159.
12. *Gupta S., Tai N.-H.* // *J. Mater. Chem. A.* 2016. V. 4. № 5. P. 1550.
13. *Chapala P.P., Bermeshev M.V., Gavrilova N.N.* // *Polymer Science A.* 2017. V. 59. № 1. P. 143.
14. *Furukawa H., Yaghi O.M.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2009. V. 131. № 25. P. 8875.
15. *Zhou H.-C., Long J.R., Yaghi O.M.* // *Chem. Rev.* 2012. V. 112. № 2. P. 673.
16. *Takada K., Matsuya H., Masuda T., Higashimura T.* // *J. Appl. Polym. Sci.* 1985. V. 30. № 4. P. 1605.
17. *McKeown N.B., Budd P.M.* // *Chem. Soc. Rev.* 2006. V. 35. № 8. P. 675.
18. *Han S.H., Misdan N., Kim S., Doherty C.M., Hill A.J., Lee Y.M.* // *Macromolecules.* 2010. V. 43. № 18. P. 7657.
19. *Alentiev D.A., Bermeshev M.V., Starannikova L.E., Bermesheva E.V., Shantarovich V.P., Bekeshev V.G., Yampolskii Y.P., Finkelshtein E.S.* // *J. Polym. Sci., Polym. Chem.* 2018. V. 56. № 12. P. 1234.
20. *Wozniak A.I., Bermesheva E.V., Gavrilova N.N., Ilyasov I.R., Nechaev M.S., Asachenko A.F., Topchiy M.A., Gribanov P.S., Bermeshev M.V.* // *Macromol. Chem. Phys.* 2018. V. 219. № 24. P. 1800323.
21. *Du N., Dal-Cin M.M., Robertson G.P., Guiver M.D.* // *Macromolecules.* 2012. V. 45. № 12. P. 5134.
22. *Liu Q., Li G., Tang Z., Chen L., Liao B., Ou B., Zhou Z., Zhou H.* // *Mater. Chem. Phys.* 2017. V. 186. P. 11.
23. *Lee J.-Y., Wood C.D., Bradshaw D., Rosseinsky M.J., Cooper A.I.* // *Chem. Commun.* 2006. № 25. P. 2670.
24. *Smith C.D.* // *J. Am. Chem. Soc.* 1966. V. 88. № 18. P. 4273.
25. *Petrov V.A., Vasil'ev N.V.* // *Curr. Org. Synth.* 2006. V. 3. P. 215.

26. *Chapala P.P., Bermeshev M.V., Lakhtin V.G., Genaev A.M., Tavtorkin A.N., Finkelshtein E.S.* // *Mendeleev Commun.* 2015. V. 25. № 5. P. 344.
27. *Nicolaou K.C., Snyder S.A., Montagnon T., Vassilikogiannakis G.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2002. V. 41. № 10. P. 1668.
28. *Bermeshev M.V., Bulgakov B.A., Genaev A.M., Kostina J.V., Bondarenko G.N., Finkelshtein E.S.* // *Macromolecules.* 2014. V. 47. № 16. P. 5470.
29. *Gaylord N.G., Deshpande A.B., Mandal B.M., Martan M.* // *J. Macromol. Sci. A.* 1977. V. 11. № 5. P. 1053.
30. *Vougioukalakis G.C., Grubbs R.H.* // *Chem. Rev.* 2010. V. 110. № 3. P. 1746.
31. *Chapala P.P., Bermeshev M.V., Starannikova L.E., Belov N.A., Ryzhikh V.E., Shantarovich V.P., Lakhtin V.G., Gavrilova N.N., Yampolskii Y.P., Finkelshtein E.S.* // *Macromolecules.* 2015. V. 48. № 22. P. 8055.
32. *Chapala P., Bermeshev M., Starannikova L., Shantarovich V., Gavrilova N., Lakhtin V., Yampolskii Y., Finkelshtein E.* // *Macromol. Chem. Phys.* 2017. V. 218. № 3. P. 1600385/1.
33. *Finkelshtein E., Gringolts M., Bermeshev M., Chapala P., Rogan Y.* // *Membrane Materials for Gas and Vapor Separation*/Ed. by Y. Yampolskii, E. Finkelshtein. 2017, London: Wiley. P. 143.
34. *Alentiev D.A., Egorova E.S., Bermeshev M.V., Starannikova L.E., Topchiy M.A., Asachenko A.F., Gribanov P.S., Nechaev M.S., Yampolskii Y.P., Finkelshtein E.S.* // *J. Mater. Chem. A.* 2018. V. 6. № 40. P. 19393.
35. *Yakubenko E., Korolev A., Chapala P., Bermeshev M., Kanateva A., Kurganov A.* // *Anal. Chim. Acta.* 2017. V. 986. P. 153.
36. *Korolev A.A., Shiryaeva V.E., Popova T.P., Bermeshev M.V., Kanateva A.Y., Kurganov A.A.* // *J. Chromatogr. A.* 2018. V. 1533. P. 174.
37. *Alentiev D.A., Dzhaparidze D.M., Gavrilova N.N., Shantarovich V.P., Kiseleva E.V., Topchiy M.A., Asachenko A.F., Gribanov P.S., Nechaev M.S., Legkov S.A., Bondarenko G.N., Bermeshev M.V.* // *Polymers.* 2018. V. 10. № 12. P. 1382.
38. *Friedman L., Litle R.L., Reichle W.R.* // *Org. Synth.* 1960. V. 40. P. 93.
39. *Chapala P.P., Bermeshev M.V., Starannikova L.E., Shantarovich V.P., Gavrilova N.N., Yampolskii Yu.P., Finkelshtein E.Sh.* // *Polymer Composites.* 2015. V. 36. № 6. P. 1029.
40. *Rapallo A., Porzio W., Zanchin G., Ricci G., Leone G.* // *Chem. Mater.* 2019.
41. *Rapallo A., Ricci G., Porzio W., Arrighetti G., Leone G.* // *Cryst. Growth Des.* 2014. V. 14. № 11. P. 5767.
42. *Lee E.J., Kim H.S., Lee B.K., Hwang W.S., Sung I.K., Lee I.M.* // *Bull. Korean Chem. Soc.* 2012. V. 33. № 12. P. 4131.
43. *Zhao C.-T., do Rosário Ribeiro M., de Pinho M.N., Subrahmanyam V.S., Gil C.L., de Lima A.P.* // *Polymer.* 2001. V. 42. № 6. P. 2455.
44. *Budd P.M., Elabas E.S., Ghanem B.S., Makhseed S., McKeown N.B., Msayib K.J., Tattershall C.E., Wang D.* // *Adv. Mater.* 2004. V. 16. № 5. P. 456.
45. *Budd P.M., Ghanem B.S., Makhseed S., McKeown N.B., Msayib K.J., Tattershall C.E.* // *Chem. Commun.* 2004. № 2. P. 230.
46. *Park H.B., Jung C.H., Lee Y.M., Hill A.J., Pas S.J., Mudie S.T., Wagner E.V., Freeman B.D., Cookson D.J.* // *Science.* 2007. V. 318. № P. 254.