

РАСТВОРИМОСТЬ N-ТРЕТ-БУТИЛАКРИЛАМИДА И ДИНИТРИЛА АЗОБИСИЗОМАСЛЯНОЙ КИСЛОТЫ В ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА

А.А. Попова — Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, г. Москва, Россия; Первый Московский государственный университет им. И.М. Сеченова, Институт регенеративной медицины, Москва, Россия. ORCID: 0000-0003-3896-6727. Эл. почта: nas.popova.04@gmail.com (для переписки).

Е.Н. Голубева — Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, г. Москва, Россия. ORCID: 0000-0002-2320-0983. Эл. почта: legol@mail.ru

© 2025 г. Поступила в редакцию 20.10. 2025 г. Прошла рецензирование 24.11. 2025 г. Принята в печать 24.11. 2025 г.

В рамках синтетического визуального метода получены изотермы растворимости мономера N-трет-бутилакриламида (НТБА) и инициатора радикальной полимеризации динитрила азобисизомасляной кислоты (ДАК) в диоксиде углерода в диапазоне температур 305,0—353,2 К и давлений 0,1—40 МПа. Установлены максимальные концентрации НТБА и ДАК при этих параметрах состояния. Обсуждаются закономерности фазового поведения «легкоплавких» низкомолекулярных соединений в CO₂. Показано, что растворимость ДАК не является фактором, ограничивающим диапазон условий в процессе полимеризации с участием НТБА.

К л ю ч е в ы е с л о в а: диоксид углерода, N-изопропилакриламд (НИПАМ), НТБА, ДАК, растворимость, газорасширенные жидкости, изотермы растворимости.

ВВЕДЕНИЕ

Стимул-чувствительные полимеры способны резко менять свои свойства, в том числе растворимость или гидрофильность в результате внешнего воздействия — температуры, рН среды, света и др. [1—3]. Эта особенность позволяет использовать стимул-чувствительные полимеры в медицинских целях, в том числе в тканевой инженерии [4] и как средства доставки лекарств [5]. Полимеры и сополимеры на основе акриламидов представляют собой наиболее распространенный класс таких материалов [6—8]. Среди них особую роль играет термочувствительный полимер поли-N-изопропилакриламид, характеризующийся нижней критической температурой растворения (НКТР) равной 305,2 К и близкой к физиологическим параметрам. Однако многие медицинские задачи, например, при дизайне «умных» медицинских повязок, требуют регулирования НКТР. Это достигается путем синтеза сополимеров N-изопропилакриламида (НИПАМ) с другими компонентами. Включение гидрофильных сомономеров в полимерную цепь приводит к повышению НКТР, тогда как гидрофобные сомомеры способствуют ее понижению [9]. Одним из перспективных для применения в медицине показал себя сополимер НИПАМ с его ближайшим гомологом — N-трет-бутилакриламидом (НТБА) [10, 11]. Гомополимер НТБА не представляет интереса, так как нерастворим в воде.

Основной способ получения сополимера НИПАМ с НТБА — радикальная полимеризация в органическом растворителе [12, 13]. Однако в биомедицине

предъявляются высокие требования к чистоте материала, который может быть загрязнен остатками растворителя, катализатора, инициатора и других добавок, а также мономера или олигомеров. В связи с этим актуальным является выбор экологичного способа получения полимеров с использованием «зеленых» растворителей. В качестве такого растворителя может быть использован сверхкритический диоксид углерода (СК-СО₂) (см., например, [14–16]). Использование СК-СО₂ открывает уникальную возможность управления такими свойствами растворителя, как плотность, полярность и вязкость, путем изменения параметров состояния сверхкритического флюида (СКФ). Изменение свойств растворителя без изменения его химического состава обеспечивает возможность влияния на кинетику полимеризации, а значит и на молекулярно-массовые характеристики полимеров. Например, ранее было показано, что при разложении инициатора свободных радикалов динитрила азобисизомаляной кислоты (ДАК) в СК-СО₂ эффективность выхода радикалов из клетки растворителя выше по сравнению с аналогичным процессом в органических растворителях [17]. Кроме того, высокая диффузионная подвижность макрорадикалов в СК-СО₂ позволяет уменьшить эффект Троммсдорфа в радикальных процессах, препятствуя локальному увеличению вязкости в системе [18]; СК-СО₂ при этом не участвует в процессах передачи цепи на растворитель, позволяя тем самым избежать появления нежелательных концевых групп [19]. Наряду с этим СК-СО₂ нетоксичен и самопроизвольно удаляется из твердого продукта при снижении давления, унося с собой летучие примеси мономера и других компонентов, что является одним из факторов, обеспечивающих возможность получения высокочистых материалов медицинского назначения.

К сожалению, одним из основных препятствий к использованию СО₂ как растворителя является ограниченная растворимость в нем многих органических веществ, в том числе виниловых мономеров. Высокомолекулярные соединения, за исключением нескольких фторсодержащих полимеров и силиконов, в нем практически не растворяются, что обуславливает протекание полимеризации акриламидов в гетерогенном режиме. Сложность фазового состава реакционной смеси в ходе радикальной полимеризации виниловых мономеров ставит в качестве одной из основных задач определение растворимости реагентов, инициатора, других добавок, в частности, контролирующих агентов, в СК-СО₂ при разных параметрах состояния. Ранее такая задача была в основном решена нами для растворимости основного мономера — НИПАМ в СК-СО₂ [20]. Для этого был использован визуальный метод, описанный подробно в [21]. В данной работе с помощью этого подхода получены изотермы растворимости мономера НТБА и инициатора радикальной полимеризации ДАК в диоксиде углерода в диапазоне температур 305,0–353,2 К и давлений 0,1–40,0 МПа. В работе обсуждаются закономерности фазового поведения «легкоплавких» низкомолекулярных соединений в СО₂.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные вещества

N-трет-Бутилакриламид (НТБА) дважды перекристаллизовывали из СК-СО₂ (3 г НТБА в 15 мл СО₂) при $T = 343,2$ К. Углекислый газ о.с.ч. (>99,995%, ООО «ПГС-СЕРВИС ЛОГИСТИКА», Россия) использовали без дополни-

тельной очистки. Динитрил азобисизомаасляной кислоты (ДАК) дважды перекристаллизовывали из этанола (5 г в 40 мл этанола) при $T = 318,2$ К.

Методика измерения растворимости НТБА и ДАК в СК-СО₂ в рамках синтетического визуального метода

Подробная методика измерения растворимости была описана нами ранее в работе [20], поэтому в данной статье изложим ее более кратко. Растворимость НТБА и ДАК в СК-СО₂ определяли с использованием оптической ячейки объемом 15,0 мл, оснащенной двумя сапфировыми окошками, магнитной мешалкой, нагревательной рубашкой, а также измерителями давления и температуры. Погрешности регистрации температуры и давления в системе составили $\pm 0,3$ К и $\pm 0,05$ МПа соответственно.

Перед началом измерений пустой реактор взвешивали на технических весах DA-5202C (BEL ENGINEERING SRL., Италия). Реактор, содержащий навеску образца, опрессовывали и взвешивали, после чего трижды промывали систему от воздуха диоксидом углерода путем повторения циклов напуск—сброс порциями по 6,0 МПа при комнатной температуре. Далее систему нагревали до максимальной температуры в исследуемом диапазоне (305,0—353,2 К). По достижении необходимой температуры с помощью плунжерного насоса Supercritical 24 (Scientific System, Inc., США) жидкий СО₂ подавали в смотровую ячейку до полного смешения двух компонентов с образованием однофазной системы. Регистрировали давление растворения НТБА или ДАК в системе и фиксировали изменение массы реактора. Затем реактор охлаждали, а описанный цикл действий повторяли в изотермических условиях для каждой температуры из исследуемого интервала (305,0—353,2 К) с шагом в 10,2 К. Определение растворимости компонентов в СК-СО₂ проводили в диапазоне давлений 0,1—40,0 МПа.

Из полученных данных плотность образования гомогенного раствора ρ_{mix} (кг/м³) (далее плотность смешения, ρ_{mix}) для навески вещества определяли по формуле:

$$\rho_{\text{mix}} = \frac{m_{\text{total}} - m_{\text{reactor}}}{V_{\text{solution}}} = \frac{m_{\text{solution}}}{V_{\text{solution}}}, \quad (1)$$

где m_{total} — масса ячейки с учетом раствора в СК-СО₂ (кг); m_{reactor} — масса пустого реактора, включающая массу якоря магнитной мешалки (кг); m_{solution} , V_{solution} — общая масса (кг) и объем (м³) раствора исследуемого соединения в СО₂ соответственно.

Построение изотерм растворимости вещества в СК-СО₂ проводили в координатах $\rho_{\text{mix}} = f(x)$ для каждой из температур в изучаемом диапазоне, где x — мольная доля вещества в СК-СО₂:

$$x = \frac{m_{\text{solute}}}{M_{r_{\text{solute}}} \left(\frac{m_{\text{total}} - m_{\text{reactor}} - m_{\text{solute}}}{M_{r_{\text{solvent}}}} + \frac{m_{\text{solute}}}{M_{r_{\text{solute}}}} \right)} = \frac{v_{\text{solute}}}{(v_{\text{solvent}} + v_{\text{solute}})}, \quad (2)$$

где m_{solute} , $M_{r_{\text{solute}}}$, m_{solvent} — масса навески (кг), молекулярная масса (кг/моль) и количество вещества растворенного соединения (моль), а $M_{r_{\text{solvent}}}$, v_{solvent} — молекулярная масса (кг/моль) и количество вещества (моль) растворителя.

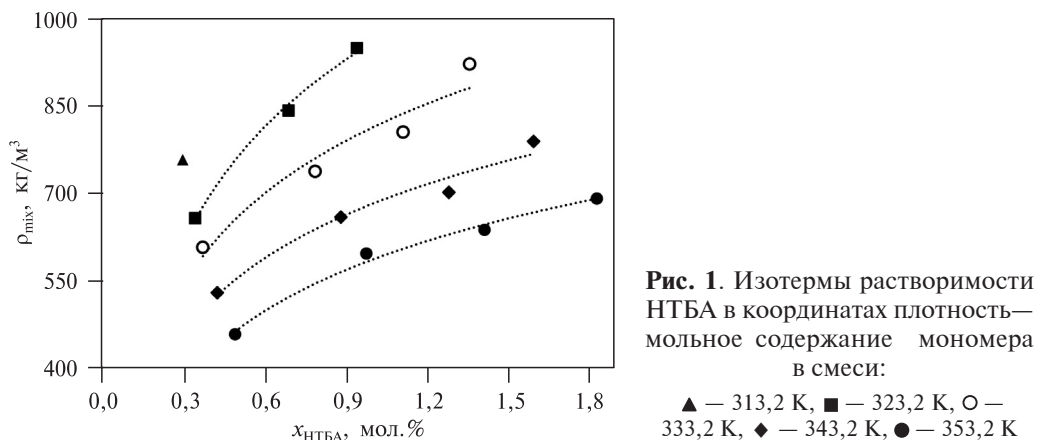
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Система НТБА-СО₂

Введение диоксида углерода в смотровую ячейку, содержащую навеску кристаллического НТБА (0,1–0,56 г), сопровождается постепенным растворением кристаллической фазы. На рис. 1 представлены изотермы растворимости НТБА ($\rho_{\text{mix}} = f(x)$), где x — мольная доля НТБА, мол. % в диапазоне давлений 0,1–40,0 МПа. Кривые разделяют двухфазную (НТБА(тв.) — раствор НТБА в СО₂) и однофазную области (гомогенный раствор).

Видно, что плотность образовавшегося насыщенного раствора НТБА в СО₂ ρ_{mix} достигает высоких значений уже при мольных долях $x < 2,0$ %. В то же время увеличение температуры в системе сопровождается уменьшением плотности смешения компонентов во всем интервале мольных долей. Это указывает на рост растворимости НТБА в системе, а значит количество СО₂, необходимое для полного растворения навески НТБА при большей температуре уменьшается. При этом при сравнении полученных изотерм видно, что прирост плотности с уменьшением температуры варьируется от 7 до 12 % при низких и высоких мольных долях НТБА соответственно, увеличиваясь симбатно содержанию НТБА в системе.

Интересно отметить, что фазовое поведение системы, содержащей ближайший гомолог НТБА — НИПАМ, существенно отличается. Так, на первом этапе кристаллический мономер НИПАМ при смешении с СО₂ уже при параметрах ниже критических ($P, T < P_k, T_k$) образует двухфазную систему, в которой фаза с большей плотностью находится в жидком агрегатном состоянии, а с меньшей — в газообразном. Такое поведение двухкомпонентной системы указывает на то, что растворение НИПАМ в выбранных условиях протекает через область ограниченной растворимости, в которой каждая из фаз содержит оба компонента в разном мольном соотношении, и лишь дальнейшее увеличение давления или температуры приводит к исчезновению границы раздела фаз и образованию гомогенного раствора. Таким образом, при докритических параметрах состояния нижняя фаза представляет собой раствор СО₂ в расплавленном НИПАМ, а верхняя — смесь паров НИПАМ с газообразным СО₂. В литературе первую из описанных фаз принято называть термином газорасширенная жидкость (с английского gas-expanded liquids).



Известно, что образование газорасширенных жидкостей характерно для систем, содержащих два взаимно растворимых компонента, один из которых при нормальных условиях представляет собой газ, а другой находится в твердом состоянии, если критическая температура первого и температура плавления второго близки [22]. Например, антрацен ($T_{пл} = 491,2$ К) образует газорасширенную жидкость в присутствии пентана ($T_k = 470,2$ К) при температурах, соответствующих докритическому состоянию углеводорода (выше 383,2 К), в то время как в этане ($T_k = 305,2$ К) температура фазового перехода меньше температуры плавления антрацена только на 20,2 К [23]. При этом нерастворимые в расплавах газы, не оказывают подобного воздействия на кристаллические вещества, и, наоборот, приводят к росту температуры плавления соединений с ростом давления газа в системе (например, система нафталин— N_2) [24]. Температура плавления НТБА в два раза выше, чем $T_{пл}$ НИПАМ, и составляет 401,2 К. Кроме того, растворимость НТБА в СК- CO_2 в несколько раз меньше, чем растворимость НИПАМ, не превышая значений $x = 1,8\%$ в интервале давлений 0,1—40,0 МПа [20]. Ранее уже было показано, что увеличение размера гидрофобного фрагмента в молекуле приводит к уменьшению ее растворимости в СК- CO_2 . Например, растворимость гомологов линейных углеводородов $-(CH_2)_n-$ в ряду с $8 \leq n \leq 30$ монотонно уменьшается с ростом n [25]. Эти два фактора, по-видимому, и определяют количественные и качественные различия в фазовом поведении этих акриламидов в присутствии CO_2 .

Система ДАК- CO_2

Поскольку ДАК претерпевает термическое разложение с образованием нитрилтретбутильных $(CH_3)_2(CN)C\bullet$ радикалов при температуре выше $T > 328,2$ К, его растворимость оценивали в более узком диапазоне температур $T = 305,0—323,2$ К. В этом диапазоне температур кристаллический при н.у. ДАК демонстрирует ограниченную растворимость в СК- CO_2 с образованием двухфазной системы жидкость—газ с преобладающим содержанием в них ДАК и CO_2 соответственно.

Из рис. 2 видно, что в исследуемом диапазоне условий ($P < 40,0$ МПа) плотность раствора ДАК в CO_2 практически не изменяется уже при концентрациях выше $x \geq 1,5$ мол. %. Изменение температуры в системе сопровождается

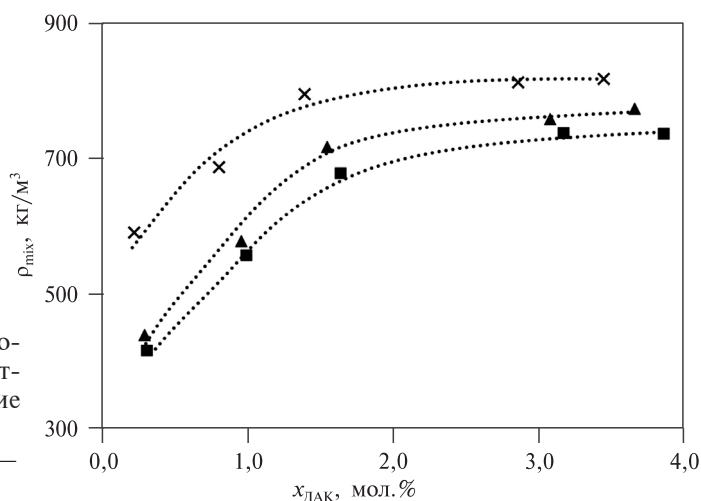


Рис. 2. Изотермы растворимости ДАК в координатах плотность — мольное содержание мономера в смеси:
× — 305,0 К, ▲ — 313,2 К, ■ — 323,2 К

увеличением растворимости, но ее прирост незначителен при переходе от 313,2 К к 323,2 К. Содержание ДАК около 4,0 мол.% не является предельным для выбранного диапазона давлений, так как плотность системы может быть увеличена по крайней мере до 1000 кг/м³. В то же время для инициирования радикальной полимеризации требуется значительно меньшая концентрация ДАК, не превышающая 0,005 мол.%. Таким образом, растворимость ДАК в СО₂ не является фактором, ограничивающим диапазон условий осуществления их полимеризации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе получены изотермы растворимости мономера НТБА и инициатора ДАК в диапазоне условий 305,0—353,2 К и 0,1—40,0 МПа. Максимальная растворимость НТБА в данных условиях не превышает 1,8 мол.%. Ранее было показано, что растворимость его гомолога (НИПАМ), отличающегося меньшей величиной неполярного фрагмента в заместителе, в несколько раз выше, что согласуется с современными представлениями о растворяющей способности СО₂. При растворении НТБА в СО₂ кристаллическая структура мономера сохраняется в диапазоне условий, соответствующих двухфазной системе, в отличие от НИПАМ, образующего газорасширенную жидкость уже при докритических параметрах СО₂. Согласно литературным данным, это может быть связано с большей разницей между температурой плавления НТБА и критической температурой СО₂ по сравнению с НИПАМ (~97 К для НТБА и ~31 К для НИПАМ). Таким образом, меньшая растворимость в СО₂ и другие особенности фазового поведения НТБА, прежде всего отсутствие области взаимной ограниченной растворимости, существенно сужает диапазон параметров для осуществления сополимеризации НИПАМ и НТБА. Для более точного определения этих параметров необходимо исследование фазовых равновесий для трехкомпонентной смеси НИПАМ—НТБА—СО₂.

В то же время максимальная концентрация ДАК, достижимая в выбранных условиях, в 800 раз превышает количества, необходимые для инициирования полимеризации акриламидов в СК-СО₂. Таким образом, растворимость ДАК не является фактором, ограничивающим диапазон условий в процессе полимеризации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 24-23-00196).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Doberenz F., Zeng K., Willems C., Zhang K., Groth T.* // J. Mater. Chem. B. 2020. Vol. 8. No 4. P. 607.
2. *Kocak G., Tuncer C., Bütün V.* // Polym. Chem. 2017. Vol. 8. No 1. P. 144.
3. *Stoychev G., Kirillova A., Ionov L.* // Advanced Optical Materials. 2019. Vol. 7. No 16. P. 1900067.
4. *Cole M.A., Voelcker N.H., Thissen H., Griesser H.J.* // Biomaterials. 2009. Vol. 30. No 9. P. 1827.
5. *Chung J.E., Yokoyama M., Yamato M., Aoyagi T., Sakurai Y., Okano T.* // J. Controlled Release. 1999. Vol. 62. No 1—2. P. 115.
6. *Schild H.G.* // Progress in Polymer Science. 1992. Vol. 17. No 2. P. 163.

7. Halperin A., Kröger M., Winnik F.M. // *Angewandte Chemie — Intern. Ed.* 2015. Vol. 54. No 51. P. 15342.
 8. Mukherji D., Kremer K. // *Polymers.* 2023. Vol. 15. No 15. P. 1.
 9. Yuan Y., Raheja K., Milbrandt N.B., Beilharz S., Tene S., Oshabaheebwa S., Gurkan U.A., Samia A.C.S., Karayilan M. // *RSC Appl. Polym.* 2023. Vol. 1. No 2. P. 158.
 10. Rochev Yu., O'Halloran D., Gorelova T., Gilcreest V., Selezneva I., Gavriyuk B., Gorelov A. // *J. Materials Science: Materials in Medicine.* 2004. Vol. 15. No 4. P. 513.
 11. Doorty K.B., Golubeva T.A., Gorelov A.V., Rochev Y.A., Allen L.T., Dawson K.A., Gallagher W.M., Keenan A.K. // *Cardiovascular Pathology.* 2003. Vol. 12. No 2. P. 105.
 12. Rochev Y., Golubeva T., Gorelov A., Allen L., Gallagher W.M., Selezneva I., Gavriyuk B., Dawson K. // *Trends in Colloid and Interface Science XV* / Ed. P.G. Koutsoukos. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. Vol. 118. P. 153.
 13. Kumari R., Singh V.K., Shekhar S. // *Macromolecular Symposia.* 2024. Vol. 413. No 1. P. 2300090.
 14. Boyère C., Jérôme C., Debuigne A. // *Eur. Polymer J.* 2014. Vol. 61. P. 45.
 15. Zetterlund P.B., Aldabbagh F., Okubo M. // *J. Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry.* 2009. Vol. 47. No 15. P. 3711.
 16. Kendall J.L., Canelas D.A., Young J.L., DeSimone J.M. // *Chemical Reviews.* 1999. Vol. 99. No 2. P. 543.
 17. DeSimone J.M., Guan Z., Elsbernd C.S. // *Science.* 1992. Vol. 257. No 5072. P. 945.
 18. Liu W., Zhang Y., Chang H., Cai R., Ma P. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2101. No 1. P. 012063.
 19. Canelas D.A., DeSimone J.M. *Polymerizations in Liquid and Supercritical Carbon Dioxide Metal Complex Catalysts Supercritical Fluid Polymerization Supramolecular Architecture* / Eds. D.A. Canelas, J.M. DeSimone, A. Harada, E. Ihara, K. Mashima, A. Nakamura, Y. Nakayama, H. Yasuda. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. Vol. 133. P. 103.
 20. Попова А.А., Костенко М.О., Голубева Е.Н. // *Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика.* 2024. Т. 19. № 3. С. 93. DOI: 10.34984/SCFTP.2024.19.3.007
 21. Dohrn R., Fonseca J.M.S., Peper S. // *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2012. Vol. 3. No 1. P. 343.
 22. Jessop P.G., Subramaniam B. // *Chem. Rev.* 2007. Vol. 107. No 6. P. 2666.
 23. Paulaitis M.E., Kander R.G., Diandredh J.R. // *Ber Bunsenges Phys Chem.* 1984. Vol. 88. No 9. P. 869.
 24. De Leeuw V.V., Poot W., De Loos Th.W., De Swaan Arons // *J. Fluid Phase Equilibria.* 1989. Vol. 49. P. 75.
 25. Rindfleisch F., DiNoia T.P., McHugh M.A. // *J. Phys. Chem.* 1996. Vol. 100. No 38. P. 15581.
-
-

SOLUBILITY OF N-*TERT*-BUTYLACRYLAMIDE AND AZOBISISOBUTYRONITRILE IN CARBON DIOXIDE

A.A. Popova — Department of Chemistry, Moscow State University, Moscow, 199991 Russia; Sechenov University, Institute for Regenerative Medicine, Moscow 119991, Russia. ORCID: 000-0003-3896-6727. E-mail: nas.popova.04@gmail.com. (*for correspondence*)

E.N. Golubeva — Department of Chemistry, Moscow State University, Moscow, 199991 Russia. ORCID: 0000-0002-2320-0983. E-mail: legol@mail.ru

The solubility isotherms of N-*tert*-butylacrylamide (NTBA) monomer and azobisisobutyronitrile (AIBN) initiator for radical polymerization in carbon dioxide at temperatures and pressures ranging from 0.1 to 40.0 MPa and 305.0 to 353.2 K were determined using synthetic visual methods. The maximum concentrations of NTBA and AIBN at these conditions were determined. The phase behavior patterns of low-molecular weight compounds with low melting points in CO₂ were discussed. It's shown that AIBN solubility doesn't limit the range of conditions for the polymerization process using NTBA.

Key words: carbon dioxide, N-izopropilakrilamid (NIPAM), NTBA, AIBN, solubility, gas expanded liquids, solubility isotherms.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was accomplished with the RSF financial support (the grant number № 24-23-00196).

REFERENCES

1. Doberenz F., Zeng K., Willems C., Zhang K., Groth T. // *J. Mater. Chem. B*. 2020. Vol. 8. No 4. P. 607.
2. Kocak G., Tuncer C., Bütün V. // *Polym. Chem.* 2017. Vol. 8. No 1. P. 144.
3. Stoychev G., Kirillova A., Ionov L. // *Advanced Optical Materials*. 2019. Vol. 7. No 16. P. 1900067.
4. Cole M.A., Voelcker N.H., Thissen H., Griesser H.J. // *Biomaterials*. 2009. Vol. 30. No 9. P. 1827.
5. Chung J.E., Yokoyama M., Yamato M., Aoyagi T., Sakurai Y., Okano T. // *J. Controlled Release*. 1999. Vol. 62. No 1–2. P. 115.
6. Schild H.G. // *Progress in Polymer Science*. 1992. Vol. 17. No 2. P. 163.
7. Halperin A., Kröger M., Winnik F.M. // *Angewandte Chemie — Intern. Ed.* 2015. Vol. 54. No 51. P. 15342.
8. Mukherji D., Kremer K. // *Polymers*. 2023. Vol. 15. No 15. P. 1.
9. Yuan Y., Raheja K., Milbrandt N.B., Beilharz S., Tene S., Oshabaheebwa S., Gurkan U.A., Samia A.C.S., Karayilan M. // *RSC Appl. Polym.* 2023. Vol. 1. No 2. P. 158.
10. Rochev Yu., O'Halloran D., Gorelova T., Gilcreest V., Selezneva I., Gavrilyuk B., Gorelov A. // *J. Materials Science: Materials in Medicine*. 2004. Vol. 15. No 4. P. 513.
11. Doorty K.B., Golubeva T.A., Gorelov A.V., Rochev Y.A., Allen L.T., Dawson K.A., Gallagher W.M., Keenan A.K. // *Cardiovascular Pathology*. 2003. Vol. 12. No 2. P. 105.
12. Rochev Y., Golubeva T., Gorelov A., Allen L., Gallagher W.M., Selezneva I., Gavrilyuk B., Dawson K. // *Trends in Colloid and Interface Science XV* / Ed. P.G. Koutsoukos. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. Vol. 118. P. 153.
13. Kumari R., Singh V.K., Shekhar S. // *Macromolecular Symposia*. 2024. Vol. 413. No 1. P. 2300090.
14. Boyère C., Jérôme C., Debuigne A. *European Polymer Journal*. 2014. Vol. 61. P. 45.
15. Zetterlund P.B., Aldabbagh F., Okubo M. // *J. Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*. 2009. Vol. 47. No 15. P. 3711.
16. Kendall J.L., Canelas D.A., Young J.L., DeSimone J.M. // *Chemical Reviews*. 1999. Vol. 99. No 2. P. 543.
17. DeSimone J.M., Guan Z., Elsbernd C.S. *Science*. 1992. Vol. 257. No 5072. P. 945.
18. Liu W., Zhang Y., Chang H., Cai R., Ma P. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2101. No 1. P. 012063.
19. Canelas D.A., DeSimone J.M. *Polymerizations in Liquid and Supercritical Carbon Dioxide Metal Complex Catalysts Supercritical Fluid Polymerization Supramolecular Architecture* / Eds. D.A. Canelas, J.M. DeSimone, A. Harada, E. Ihara, K. Mashima, A. Nakamura, Y. Nakayama, H. Yasuda. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. Vol. 133. P. 103.
20. Popova A.A., Kostenko M.O., Golubeva E.N. *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2024. Vol. 18. № 8. P. 1869. DOI: 10.34984/SCFTP.2024.19.3.007
21. Dohrn R., Fonseca J.M.S., Peper S. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2012. Vol. 3. No 1. P. 343.
22. Jessop P.G., Subramaniam B. *Chem. Rev.* 2007. Vol. 107. No 6. P. 2666.
23. Paulaitis M.E., Kander R.G., Diandreth J.R. *Ber Bunsenges Phys Chem.* 1984. Vol. 88. No 9. P. 869.
24. De Leeuw V.V., Poot W., De Loos Th.W., De Swaan Arons J. *Fluid Phase Equilibria*. 1989. Vol. 49. P. 75.
25. Rindfleisch F., DiNoia T.P., McHugh M.A. // *J. Phys. Chem.* 1996. Vol. 100. No 38. P. 15581.