

1,1'-АЗО-БИС[3-(НИТРО-NNO-АЗОКСИ)-1Н-1,2,4-ТРИАЗОЛ]: КИНЕТИКА РАЗЛОЖЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ

Л. Я. Мельникова¹, В. П. Синдицкий², Н. Е. Леонов³, М. С. Кленов⁴

Аннотация: В неизотермических и изотермических условиях исследован термический распад 1,1'-азо-бис[3-(нитро-NNO-азокси)-1Н-1,2,4-триазола] (ANAzTr). Полученная энергия активации разложения ANAzTr в жидкой фазе (37,6 ккал/моль) близка к расчетной энергии диссоциации связи N–NO₂ (33–34 ккал/моль). На основании анализа продуктов разложения предложен возможный механизм распада ANAzTr. Соединение ANAzTr оказалось быстрогорящим веществом, которое по всем параметрам (стабильность, плотность, скорость и давление детонации, температура горения) превосходит тетразен. Горение ANAzTr, несмотря на очень короткие времена пребывания вещества в конденсированной фазе, определяется реакцией его разложения при температурах поверхности. Оценена зависимость температуры поверхности от давления.

Ключевые слова: 1,1'-азо-бис[3-(нитро-NNO-азокси)-1Н-1,2,4-триазол]; нитро-NNO-азоксигруппа; термическая стабильность; кинетика разложения; горение

DOI: 10.30826/CE25180313

EDN: QEBZSE

Литература

1. Leonov N. E., Klenov M. S., Anikin O. V., Churakov A. M., Strelenko Yu. A., Monogarov K. A., Tartakovsky V. A. First synthesis of aliphatic nitro-NNO-azoxy compounds // *Eur. J. Org. Chem.*, 2019. Vol. 2019. No. 1. P. 91–94. doi: 10.1007/s11172-024-4269-8.
2. Anikin O. V., Leonov N. E., Klenov M. S., Churakov A. M., Voronin A. A., Guskov A. A., Muravyev N. V., Strelenko Yu. A., Fedyanin I. V., Tartakovsky V. A. An energetic (nitro-NNO-azoxy) triazolo-1,2,4-triazine // *Eur. J. Org. Chem.*, 2019. Vol. 2019. No. 26. P. 4189–4195. doi: 10.1002/ejoc.201900314.
3. Leonov N. E., Klenov M. S., Anikin O. V., Churakov A. M., Strelenko Y. A., Voronin A. A., Lempert D. B., Muravyev N. V., Fedyanin I. V., Semenov S. E., Tartakovsky V. A. Synthesis of new energetic materials based on furazan rings and nitro-NNO-azoxy groups // *ChemistrySelect*, 2020. Vol. 5. No. 39. P. 12243–12249. doi: 10.1002/slct.202003182.
4. Wang Y., Li S., Li Y., Zhang R., Wang D., Pang S. A comparative study of the structure, energetic performance and stability of nitro-NNO-azoxy substituted explosives // *J. Mater. Chem. A*, 2014. Vol. 2. No. 48. P. 20806–20813. doi: 10.1039/C4TA04716H.
5. Леонов Н. Е., Кленов М. С., Чураков А. М., Конькова Т. С., Мирошниченко Е. А., Матюшин Ю. Н., Муравьев Н. В., Тартаковский В. А. Сравнение экспериментальной энтальпии образования и других физико-химических характеристик соединений, содержащих группы C–NO₂ и C–N(O)=N–NO₂ // *Изв. АН. Сер. хим.*, 2022. Т. 71. № 8. С. 1634–1640.
6. Кленов М. С., Леонов Н. Е., Чураков А. М., Тартаковский В. А. 1,1'-(Е)-Диазен-1,2-диилбис[3-(нитро-NNO-азокси)-1Н-1,2,4-триазол] и способ его получения. Патент РФ № RU2782118, 21.10.2022.
7. Кленов М. С., Чураков А. М., Воронин А. А., Виноградов Д. Б., Тартаковский В. А. Создание новых азот-кислородных систем в Лаборатории химии нитросоединений Института органической химии имени Н. Д. Зелинского Российской академии наук // *Изв. АН. Сер. хим.*, 2024. Т. 73. № 5. С. 1473–1494.
8. Yin P., Parrish D. A., Shreeve J. M. N-diazo-bridged nitroazoles: Catenated nitrogen-atom chains compatible with nitro functionalities // *Chem. — Eur. J.*, 2014. Vol. 20. No. 22. P. 6707–6712. doi: 10.1002/chem.201402762.
9. Кленов М. С., Лемперт Д. Б., Коннов А. А., Гуляев Д. А., Вацадзе И. А., Матюшин Ю. Н., Мирошниченко Е. А., Воробьев А. Б., Иноземцев Я. О., Конькова Т. С., Иноземцев А. В., Пивкина А. Н., Дмитриенко А. О., Тартаковский В. А. 1,2-Бис(нитроазол-1-ил)диазены: усовершенствование метода синтеза, определение энтальпий образования и расчет основных энергетических характеристик смесевых твердых ракетных топлив на их основе // *Изв. АН. Сер. хим.*, 2022. Т. 71. № 6. С. 1123–1134.
10. Kissinger H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis // *Anal. Chem.*, 1957. Vol. 29. No. 11. P. 1702–1706. doi: 10.1021/ac60131a045.
11. Robertson A. J. B. The thermal decomposition of explosives. Part II. Cyclotrimethylenetrinitramine and cyclotetramethylenetetranitramine // *T. Faraday Soc.*, 1949. Vol. 45. P. 85–93. doi: 10.1039/TF9494500085.

¹Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, melnikova.l.i@muctr.ru

²Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, vps@muctr.ru

³Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук, leonovne@ioc.ac.ru

⁴Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук, klenov@ioc.ac.ru

12. *Churakov A. M., Ioffe S. L., Tartakovskii V. A.* Synthesis of 1-aryl-2-nitrodiazene 1-N-oxides // *Mendeleev Commun.*, 1996. Vol. 1. No. 6. P. 20–22. doi: 10.1070/МС1996v006n01АВЕН000560.
13. *Чураков А. М.* Циклические сопряженные полиазотные системы нового типа: Дис. . . . д-ра хим. наук. — М.: ИОХ РАН им. Н. Д. Зелинского, 2005. 224 с.
14. *Синдицкий В. П., Егоршев В. Ю., Березин М. В., Серушкин В. В., Милехин Ю. М., Гусев С. А., Матвеев А. А.* Закономерности горения высокоэнергетического каркасного нитрамина гексанитрогексаазаизовюрцитана // *Хим. физика*, 2003. Т. 22. № 7. С. 69–74.
15. *Синдицкий В. П., Буржава А. В., Егоршев В. Ю., Шереметев А. Б., Зеленов В. П.* Горение фуразанотетразиндиоксида // *Физика горения и взрыва*, 2013. Т. 49. № 1. С. 134–137.
16. *Фогельзанг А. Е., Егоршев В. Ю., Пименов А. Ю., Саклантний А. Р., Синдицкий В. П., Светлов Б. С.* Исследование стационарного горения инициирующих взрывчатых веществ при высоких давлениях // *Докл. Акад. наук СССР*, 1985. Т. 282. № 6. С. 1449–1452.
17. *Колесов В. И., Капранов К. О., Ткачева А. В., Кулагин И. А.* Взрывчатые характеристики тетрацена и МТХ-1 // *Физика горения и взрыва*, 2021. Т. 57. № 3. С. 104–110. doi: 10.15372/FGV20210310.
18. *Stull D. R., Westrum E. F., Sinke G. C.* The chemical thermodynamics of organic compounds. — New York, NY, USA: J. Wiley, 1969. 865 p.
19. *Илюшин М. А., Шугалей И. В., Целинский И. В., Гарабаджиу А. В.* Некоторые экологические проблемы использования энергонасыщенных соединений для средств инициирования и пути их решения // *Экологическая химия*, 2012. Т. 21. № 3. С. 154–163.
20. *Багал Л. И.* Химия и технология инициирующих взрывчатых веществ. — М.: Машиностроение, 1975. 456 с.
21. *Meyer R., Köhler J., Homburg A.* Explosives. — 6th ed. — Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007. 442 p.
22. *Sumin A. I., Kondrikov B. N., Gamezo V. N., Raikova V. M.* Shock and detonation general kinetics and thermodynamics in reactive systems computer package // 11th Detonation Symposium (International) Proceedings. — Snowmass, CO, USA, 1998. P. 30–35.
23. *Belov G. B.* Thermodynamic analysis of combustion products at high temperature and pressure // *Propell. Explos. Pyrot.*, 1998. Vol. 23. P. 86–89. doi: 10.1002/(SICI)1521-4087(199804)23:2<86::AID-PREP86>3.0.CO;2-2.
24. *Синдицкий В. П., Егоршев В. Ю., Березин М. В.* Горение энергоемких циклических нитраминов // *Хим. физика*, 2003. Т. 22. № 4. С. 56–63.
25. *Sinditskii V. P., Egorshv V. Y., Serushkin V. V., Levshenkov A. I., Berezin M. V., Filatov S. A.* Combustion of energetic materials governed by reactions in the condensed phase // *Int. J. Energetic Materials Chemical Propulsion*, 2010. Vol. 9. No. 2. P. 147–192. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v9.i2.30.
26. *Sinditskii V. P., Smirnov S. P., Egorshv V. Y.* Thermal decomposition of NTO: An explanation of the high activation energy // *Propell. Explos. Pyrot.*, 2007. Vol. 32. No. 4. P. 277–287. doi: 10.1002/prep.200700029.
27. *Rudakov G. F., Kozlov I. B., Boev N. V., Zinchenko S. S., Melnikova L. Y., Egorshv V. Y., Sinditskii V. P.* Synthesis and physicochemical properties of energetic 1,2,4,5-tetrazinyl derivatives of 5-nitro-2,4-dihydro-1,2,4-triazol-3-one // *ChemistrySelect*, 2021. Vol. 6. No. 30. P. 7654–7662. doi: 10.1002/slct.202102160.

Поступила в редакцию 06.01.2025

После доработки 14.01.2025

Принята к публикации 27.01.2025