
СЕКЦИЯ 2

ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

SECTION 2

EXPLOSION AND DETONATION PHENOMENA

СОДЕРЖАНИЕ

2-1. Модель воспламенения и роста для экспериментов по ударному инициированию мелкодисперсного гексанитростильбена (ГНС-IV)

Вэй Цао, Вэй Го, Ша Ян, Цингуань Сун, Бин Хуан, Юн Хань

Институт химических веществ, Китайская академия инженерной физики, Мянъян, Китай

2-1. Ignition and growth modeling of plane wave shock initiation experiments on ultrafine Hexanitrostilbene (HNS-IV)

Wei Cao, Wei Guo, Sha Yang, Qingguan Song, Bing Huang, Yong Han

Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, China

2-2. Программно-аппаратный комплекс Наногейт-22/ПАК. Калибровка, коррекция искажений и результаты применения комплекса в качестве средства измерения пространственно-временных характеристик быстропротекающих процессов

М. И. Крутик¹, В. А. Аринин², Б. И. Ткаченко², С. В. Дудин³

¹ООО «Научно-производственное предприятие НАНОСКАН», Москва, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров, Россия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

2-2. The Nanogate-22/HSC hardware and software complex. Calibration, correction of distortions and results of application as a measuring instrument of the spatio-temporal characteristics of high speed processes

M. I. Krutik¹, V. A. Arinin², B. I. Tkachenko², S. V. Dudin³

¹NANOSCAN Scientific and Production Enterprise Moscow, Russia

²FSUE "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics", Sarov, Russia

³Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

2-3. Применение методов термического анализа для определения стабильности взрывчатых веществ

М. Ф. Ахметов

Филиал ООО «Мелитэк», Екатеринбург, Россия

2-3. Application of thermal analysis methods to determine the stability of explosives

M. F. Akhmetov

Branch of Melytec LLC, Yekaterinburg, Russia

2-4. Ослабление метательной способности взрывчатого вещества с помощью гранулированного ослабителя

С. В. Балужкин, А. Ю. Симонов, Г. В. Куликов, М. В. Никифоров

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-4. Weakening of the Propelling Capacity of an HE by Means of a Granular Attenuator

S. V. Balushkin, A. Yu. Simonov, G. V. Kulikov, M. V. Nikiforov

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-5. Влияние технологии получения ТАТБ на его чувствительность к тепловым и ударно-волновым воздействиям

И. А. Баталова, Т. В. Антипова, И. А. Ахлюстин, Ю. А. Беленовский, А. Ю. Гармашев, А. В. Еганова, И. Э. Косолапов, К. М. Мирошкин, К. М. Просвирнин, И. В. Чемагина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-5. Influence of TATB fabrication technology on its sensitivity to thermal and shock impacts

I. A. Batalova, T. V. Antipova, I. A. Akhlyustin, Yu. A. Belenovskii, A. Yu. Garmashev, A. V. Eganova, I. E. Kosolapov, K. M. Miroshkin, K. M. Prosvirnin, I. V. Chemagina

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-6. Исследование состава газообразных продуктов горения октогена в воздушной среде и среде гелия

К. Н. Беркутова, А. В. Сарафанников, А. Ю. Гармашев, Н. П. Тайбинов, О. В. Хрулева, И. А. Баталова, Т. В. Антипова, Ю. А. Шахторин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-6. Analysis of composition of HMX combustion gas products in air and helium environments

K. N. Berkutova, A. V. Sarafannikov, A. Yu. Garmashev, N. P. Taibinov, O. V. Khruleva, I. A. Batalova, T. V. Antipova, Yu. A. Shakhtorin

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-7. Исследование свойств пластизольного малочувствительного ВВ с улучшенной детонационной способностью

Д. М. Гагаркин, Д. П. Дудник, А. В. Сарафанников, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Гармашев, К. М. Просвирнин, К. М. Мирошкин, А. И. Ахметзянов, И. А. Баталова, К. В. Еганов, А. С. Гремитских

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-7. Studying the properties of insensitive plastisol HE with enhanced detonability

D. M. Gagarkin, D. P. Dudnik, A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov, A. Yu. Garmashev, K. M. Prosvirnin, K. M. Miroshkin, A. I. Akhmetzyanov, I. A. Batalova, K. V. Eganov, A. S. Gremitskih

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-8. Исследование физико-химических и взрывчатых характеристик ВВ НТО

Д. М. Гагаркин, Д. П. Дудник, С. В. Шахмаев, А. В. Сарафанников, Е. Б. Смирнов, К. В. Ковалева, К. М. Просвирнин, Ю. А. Шахторин, И. В. Чемагина, И. А. Макарачев, Л. Н. Шинкарева

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-8. Study of physical, chemical, and explosive properties of NTO

D. M. Gagarkin, D. P. Dudnik, S. V. Shakhmaev, A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov, K. V. Kovaleva, K. M. Prosvirnin, Yu. A. Shakhtorin, I. V. Chemagina, I. A. Makarчев, L. N. Shinkareva

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-9. Лазерное инициирование низкоплотных смесей ТЭНа с нанодисперсным алюминием импульсами наносекундной длительности

А. Г. Глущенко, М. С. Суров, А. Р. Бакиров, В. И. Сдобнов, А. В. Станкевич, А. Ю. Гармашев, Д. В. Фролов, Д. А. Грибанов, С. М. Долгих, Д. В. Петров

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-9. Initiation of Low-Density Mixtures of Petn and Nanodispersed Aluminum by Nanosecond Laser Pulses

A. G. Gluschenko, M. S. Surov, A. R. Bakirov, V. I. Sdobnov, A. V. Stankevich, A. Yu. Garmashev, D. V. Frolov, D. A. Gribanov, S. M. Dolgikh, D. V. Petrov

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-10. Применение радиоволнового метода регистрации для определения относительной метательной способности бризантных взрывчатых веществ

Г. А. Гребёнкин, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин, И. Г. Галиуллин, И. А. Ахлюстин, К. В. Еганов, К. М. Мирошкин, А. С. Гремитских

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-10. The radio-wave recording method to estimate relative driving capability of high explosives

G. A. Grebyonkin, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, K. M. Prosvirnin, I. G. Galiullin, I. A. Akhlyustin, K. V. Eganov, K. M. Miroshkin, A. S. Gremitskikh

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2.11. Особенности разложения октогена в герметичных условиях

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, О. Н. Козлова, А. С. Емельянов

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва, Россия

2.11. Features of HMX decomposition under constant volume conditions

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, O. N. Kozlova, A. S. Emelyanov

Central research institute of chemistry and mechanics, Moscow, Russia

2.12. Фазовые переходы в октогене

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, С. А. Атысов, А. С. Емельянов

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва, Россия

2.12. HMX phase transitions

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, S. A. Atyasov, A. S. Emelyanov

Central research institute of chemistry and mechanics, Moscow, Russia

2.13. Динамические явления при распространении газовой детонации в неоднородных средах

А. Р. Касимов, А. Ю. Голдин

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

2.13. Dynamic phenomena in gas detonation propagation in nonuniform media

A. R. Kasimov, A. Yu. Goldin

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

2.14. Детонационный синтез наночастиц палладия и применение их в задачах катализа

А. О. Кашкаров¹, Е. Ю. Герасимов², Б. Л. Мороз², Д. А. Булушев², Ф. С. Голубь², Э. Р. Прууэл¹, Н. А. Хлебановский³

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

2.14. Detonation synthesis of palladium nanoparticles and their application in tasks of catalysis

A. O. Kashkarov¹, E. Y. Gerasimov², B. L. Moroz², D. A. Bulushev², F. S. Golub², E. R. Prueel¹, N. A. Khlebanovskii³

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Boreskov Institute of Catalysis, SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

2.15. Изучение некоторых свойств пластичного ВВ на основе бензотрифуроксана, подвернутого длительному хранению

A. V. Klepinin, D. M. Gagarkin, D. P. Dudnik, A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov, A. Yu. Garmashev, S. V. Shakhmaev, K. M. Prosvirnin, I. V. Chemagina

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2.15. Investigation of some properties of long-stored benzotrifuroxane-based plastic HE

A. V. Klepinin, D. M. Gagarkin, D. P. Dudnik, A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov, A. Yu. Garmashev, S. V. Shakhmaev, K. M. Prosvirnin, I. V. Chemagina

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2.16. Разложение пластифицированного октогена за фронтом ударной волны

A. M. Klimov, K. N. Panov, M. E. Shavrin

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва, Саров, Россия

2.16. Decomposition of plasticized octogen behind the shock wave front

A. M. Klimov, K. N. Panov, M. E. Shavrin

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics", Institute of Experimental Gas Dynamics and Explosion Physics, Sarov, Russia

2-17. Исследование процесса разворота детонационной волны в образцах низкочувствительного взрывчатого вещества

A. Э. Клищенко, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин, И. Г. Галиуллин, К. М. Мирошкин, М. М. Банников

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-17. Study of the detonation wave turning in insensitive he samples

A. E. Klischenko, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannkov, K. M. Prosvirnin, I. G. Galiullin, K. M. Miroshkin, M. M. Bannikov

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-18. Модель разложения октогена в условиях динамического нагрева

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, М. М. Жукова, Д. А. Костеров

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва, Россия

2-18. HMX decomposition model under dynamic heating conditions

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, M. M. Zhukova, D. A. Kosterov

Central research institute of chemistry and mechanics, Moscow, Russia

2-19. Динамика, симметрия и ударно-индуцированное «пыление» при квазиизэнтропическом и изэнтропическом ускорении цилиндрических лайнеров

*С. В. Ерунов^{1,2}, В. А. Огородников^{1,2}, А. О. Бликов^{1,2}, В. Н. Князев¹, Е. В. Кулаков¹, *, А. Б. Георгиевская^{1,2}, Н. Б. Давыдов¹, А. С. Соколова¹, Е. А. Чудаков¹, М. В. Жерноклетов¹, А. В. Романов¹, А. В. Рыжков¹, А. С. Пупков¹, И. А. Блинов^{1,2}, В. А. Аринин¹, А. В. Котин¹, В. А. Комраков¹, М. В. Антипов¹, А. П. Явтушенко¹*

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

²Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

2-19. Dynamics, symmetry and shock-induced ejection at quasi-isentropic and isentropic acceleration of cylindrical liners

*S. V. Erunov^{1,2}, V. A. Ogorodnikov^{1,2}, A. O. Blikov^{1,2}, V. N. Knyazev¹, E. V. Kulakov^{1, *}, A. B. Georgievskaya^{1,2}, N. B. Davydov¹, A. S. Sokolova¹, E. A. Chudakova¹, M. V. Zhernokletov¹, A. V. Romanov¹, A. V. Ryzhkov¹, A. S. Pupkov¹, I. A. Blinov^{1,2}, V. A. Arinin¹, A. V. Kotin¹, V. A. Komrakov¹, M. V. Antipov¹, A. P. Yavtushenko¹*

¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

²R. E. Alexeev Nizhegorodskiy state technical university, Nizhniy Novgorod, Russia

2-20. Численное моделирование взаимодействия гетерогенной детонации с пористой вставкой конечной длины

С. А. Лаврук, Д. А. Тропин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

2-20. Numerical simulation of heterogeneous detonation interaction with finite length porous inserts with obstacles

S. A. Lavruk, D. A. Tropin

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russia

2-21. Исследование функциональных характеристик энергонасыщенного материала предназначенного для газодинамического разрыва нефтяного пласта

А. А. Лачугин, А. А. Марсов, А. С. Петров, А. А. Мокеев, Я. О. Павлова

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия

2-21. Study of the functional characteristics of energysaturated material intended for gas-dynamic fracturing of oil reservoir

A. A. Lachugin, A. A. Marsov, A. S. Petrov, A. A. Mokeev, Ya. O. Pavlova

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

2-22. Применение сопловой установки для исследования особенностей горения высокоплотных топлив

К. С. Рogaев, А. С. Дьячковский, А. Н. Ищенко, Н. М. Саморокова, Е. Ю. Степанов, А. Д. Сидоров

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

2-22. The use of a nozzle installation for studying the peculiarities of combustion of high-density propellants

K. S. Rogaev, A. S. D'yachkovskij, A. N. Ishhenko, N. M. Samorokova, E. Yu. Stepanov, A. D. Sidorov

National research Tomsk State University, Russian Federation, Tomsk, Russia

2-23. Применение методики малоуглового рентгеновского рассеяния в изучении быстропротекающих процессов

И. А. Рубцов^{1,2}, К. А. Тен², Э. Р. Прууэл², А. О. Кашкаров², А. А. Студенников^{1,2}, В. П. Халеменчук², Я. В. Зубавичус¹, К. Э. Купер¹, А. В. Бухтияров¹, Б. П. Толочко³

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

2-23. Application of the technique of small-angle X-ray scattering in the study of fast-flowing processes

I. A. Rubtsov^{1,2}, K. A. Ten², E. R. Prueel², A. O. Kashkarov², A. A. Studennikov^{1,2}, V. P. Khalemenchuk², Ya. V. Zubavichus¹, K. E. Kuper¹, A. V. Bukhtiyarov¹, B. P. Tolochko³

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

²SRF "SKIF" Boreskov Institute of Catalysis, SB RAS, Kol'tsovo, Russia

³Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Novosibirsk, Russia

2-24. Энергонасыщенные композиты на основе наноструктурированного пористого кремния

Г. Г. Савенков^{1,2,3}, У. М. Побережная^{1,3}, В. М. Фрейман¹, А. Г. Зегря¹, А. А. Карпова¹, Д. В. Фадеев⁴, Г. Г. Зегря¹

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Москва, Россия

²АО «Машиностроительный завод «Армалит», Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

⁴АО «Муромский приборостроительный завод», Муром, Россия

2-24. Energy-saturated composites based on nanostructured porous silicon

G. G. Savenkov^{1,2,3}, U. M. Poberezhnaya^{1,3}, V. M. Freiman¹, A. G. Zegrya¹, A. A. Karpova¹, D. V. Fadeev⁴, G. G. Zegrya¹

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

²Machine-Building Plant "Armalit", St. Petersburg, Russia

³St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia

⁴Murom Device-Making Plant, Murom, Russia

2-25. Использование бесфталатных пластификаторов при разработке пластичного энергонасыщенного материала промышленного назначения

А. С. Сальников¹, А. С. Куражов¹, Н. И. Сальникова¹, Е. А. Борисова¹, Д. А. Борисов¹, П. В. Кочнев²

¹ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия

²Проектный институт «СоюзХимПромПроект», Казань, Россия

2-25. The use of phthalate-free plasticizers in the development of plastic energetic material for industrial use

A. S. Salnikov¹, A. S. Kyrzhov¹, N. I. Salnikova¹, E. A. Borisova¹, D. A. Borisov¹, P. V. Kochnev²

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian

²Design Institute "Soyuzkhimpromproekt", Kazan, Russian

2-26. Исследование влияния добавления углеродных нанотрубок на чувствительность малоплотного заряда тротила

Н. П. Сатонкина^{1,2}, А. П. Ершов¹, А. О. Кашкаров¹, И. А. Рубцов¹, А. А. Кузьминых², С. С. Пудова², М. С. Терехова²

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

2-26. Study of the effect of adding carbon nanotubes on the sensitivity of a low-density TNT charge

N. P. Satonkina^{1,2}, A. P. Ershov¹, A. O. Kashkarov¹, I. A. Rubtsov¹, A. A. Kuzminykh², S. S. Pudova², M. S. Terekhova²

¹Institute of Hydrodynamics, M. A. Lavrentiev SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

2-27. Механизм и кинетика полиморфного перехода β - α в 2,4-динитроанизоле

А. В. Станкевич^{1,2}, Н. А. Распутин², А. Х. Рудина¹, В. И. Филякова², Г. Л. Русинов², В. Н. Чарушин²

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

2-27. Mechanism and kinetics of the β - α polymorphic transition in 2,4-dinitroanisole

A. V. Stankevich^{1,2}, N. A. Rasputin², A. Kh. Rudina¹, V. I. Filyakova², G. L. Rusinov², V. N. Charushin²

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

2-28. Методика определения химизма и кинетики переходных состояний быстропротекающих химических процессов

А. В. Станкевич

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-28. Methodology for determining the chemistry and kinetics of transient states for fast-flowing chemical processes

A. V. Stankevich

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-29. Тензоры термической деформации различных полиморфных модификаций 2,4-динитроанизола

А. В. Станкевич^{1,2}, Н. А. Распутин², А. Х. Рудина¹, В. И. Филякова², Г. Л. Русинов², В. Н. Чарушин²

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

2-29. Tensors of thermal deformation for various polymorphic modifications of 2,4-dinitroanisole

A. V. Stankevich^{1,2}, N. A. Rasputin², A. Kh. Rudina¹, V. I. Filyakova², G. L. Rusinov², V. N. Charushin²

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

2-30. Тензоры термической деформации α -модификации сверхчистых молекулярных кристаллов 3-нитро-1,2,4-триазол-5-она

А. В. Станкевич, Д. М. Гагаркин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-30. Thermal strain tensors for α -modification of ultrapure molecular crystals of 3-nitro-1,2,4-triazole-5-one

A. V. Stankevich, D. M. Gagarkin

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-31. Тензоры термической деформации сверхчистых молекулярных кристаллов γ и δ 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена

А. В. Станкевич

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-31. Tensors of thermal deformation of ultrapure molecular crystals γ and δ 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene

A. V. Stankevich 65

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-32. Химическая совместимость и механизм взаимодействия компонентов смесей светочувствительных ВВ на основе тэна при термическом воздействии

А. В. Станкевич, А. Р. Бакиров, И. В. Чемагина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-32. Chemical compatibility and mechanism of interaction of components for mixtures of photosensitive explosives based on PETN under thermal exposure

A. V. Stankevich, A. R. Bakirov, I. V. Chemagina

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-33. Кинетика и механизм химических реакций взаимодействия фторида кобальта (III) с углеродом

A. B. Станкевич, А. Х. Рудина, И. В. Чемагина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-33. Kinetics and mechanism of chemical reactions of cobalt (III) fluoride interaction with carbon

A. V. Stankevich, A. Kh. Rudina, I. V. Chemagina

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-34. Кинетика сублимации сверхчистых молекулярных кристаллов энергоемких соединений

A. B. Станкевич

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-34. Kinetics of sublimation for ultrapure molecular crystals of energetic compounds

A. V. Stankevich

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-35. Численное моделирование газодинамических процессов в коаксиально-слоистых комбинированных изделиях из различных типов энергетических материалов

A. B. Станкевич, Д. В. Петров

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-35. Numerical simulation for gas-dynamic processes in coaxially-layered combined products made of various types of energetic materials

A. V. Stankevich, D. V. Petrov

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-36. Механизм образования различных форм нитрида углерода в волне горения и детонации

A. B. Станкевич^{1,2}, С. Г. Толщина², А. В. Коротина², Г. Л. Русинов²

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

2-36. Mechanism of formation of various forms of carbon nitride in the wave of combustion and detonation

A. V. Stankevich^{1,2}, S. G. Tolshchina², A. V. Korotina², G. L. Rusinov²

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

2-37. Вопросы устойчивости продуктов быстропротекающих реакций фторирования бора, кремния и углерода

А. В. Станкевич

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-37. Issues of stability of products for fast-flowing boron, silicon and carbon fluorination reactions

A. V. Stankevich

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-38. Кинетика окисления механоактивированных интерметаллидов алюминия

А. В. Станкевич¹, М. А. Уймин², А. Е. Ермаков², И. В. Чемагина², С. И. Новиков²

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт физики металлов, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

2-38. Kinetics of oxidation of mechanically activated aluminum intermetallics

A. V. Stankevich¹, M. A. Uymin², A. E. Ermakov², I. V. Chemagina², S. I. Novikov²

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

²Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

2-39. Синтез и физико-химические свойства солей 3-нитро-4,5-дигидро-1,2,4-триазол-5-она

Д. С. Ячевский¹, А. В. Станкевич^{1,2}, Г. Л. Русинов¹, И. В. Чемагина², В. Н. Чарушин¹

¹Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-39. Synthesis and physico-chemical properties of 3-nitro-4,5-dihydro-1,2,4-triazol-5-one salts

D. S. Yachevsky¹, A. V. Stankevich^{1,2}, G. L. Rusinov¹, I. V. Chemagina², V. N. Charushin¹

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

2-40. Синтез и термическая стабильность некоторых полиазотсодержащих производных [1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразина

С. Г. Толщина¹, А. В. Коротина¹, Р. И. Ишметова¹, А. В. Станкевич^{1,2}, И. В. Чемагина², Г. Л. Русинов¹, В. Н. Чарушин¹

¹Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-40. Synthesis and thermal stability of some polynitrogen-containing derivatives of [1,2,4]triazolo[4,3-*b*][1,2,4,5]tetrazine

S. G. Tolshchina¹, A. V. Korotina¹, R. I. Ishmetova¹, A. V. Stankevich^{1,2}, I. V. Chemagina², G. L. Rusinov¹, V. N. Charushin¹

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

2-41. Структура и электронные свойства**1-(дифторамино)динитрометил-3,4-динитро-1H-пиразола**

К. Ю. Супоницкий¹, Т. К. Шкинева¹, И. Л. Далингер¹, А. В. Станкевич²

¹Институт органической химии им. Н. Д. Зеленского РАН, Москва, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-41. Structure and electronic properties for 1-(difluoroamino) dinitromethyl-3,4-dinitro-1H-pyrazole

K. Yu. Suponitskiy¹, T. K. Shkineva¹, I. L. Dalinger¹, A. V. Stankevich²

¹N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, RAS, Moscow, Russia

²FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-42. Разложение октогена в негерметичных условиях

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, А. А. Костерова, В. Н. Алфимов

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва, Россия

2-42. HMX decomposition under constant pressure conditions

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, A. A. Kosterova, W. N. Alfimov

Central research institute of chemistry and mechanics, Moscow, Russia

2-43. Распад октогена в жидкой и газовой фазах

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, С. А. Атясов, А. А. Костерова

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва, Россия

2-43. HMX decomposition in liquid and gaseous phase

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, S. A. Atyasov, A. A. Kosterova

Central Research Institute Of Chemistry And Mechanics, Moscow, Russia

2-44. Влияние ультразвуковой обработки на физико-химические характеристики кристаллов индивидуального взрывчатого вещества из класса ароматических нитросоединений

А. Ю. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, Н. А. Алехина, А. Н. Филимоненко

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-44. Effect of Ultrasonic Treatment on Physical and Chemical Characteristics of Crystals of Individual Highly Explosive Nitro Aromatic Compound

A. Yu. Tarasov, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, N. A. Alekhina, A. N. Filimonenko

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-45. Испарение нагретого 2,4-динитроанизола и влияние скорости охлаждения расплава на получаемую полиморфную модификацию

А. Ю. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. А. Гайсина, А. В. Соболевская, И. В. Чемагина⁸⁶

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-45. Evaporation of Heated 2,4-Dinitroanisole and Influence of Melt Cooling Rate on the Obtained Polymorphic Modification

A. Yu. Tarasov, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, K. A. Gaisina, A. V. Sobolevskaya, I. V. Chemagina

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-46. Ультразвуковая обработка кристаллов индивидуального взрывчатого вещества из класса нитраминов и ее влияние на детонационную способность

А. Ю. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, Н. А. Алехина, А. Н. Филимоненко, Д. П. Дудник, В. Н. Дунаев

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-46. Ultrasonic treatment of the individual nitramine-explosive crystals and its effect on the detonation properties

A. Yu. Tarasov, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, N. A. Alekhina, A. N. Filimonenko, D. P. Dudnik, V. N. Dunaev

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-47. Численное исследование распространения газовой детонации в плоском прямоугольном канале с препятствиями

В. М. Темербеков, Д. А. Тропин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

2-47. Numerical investigation of the gas detonation propagation in the plane rectangular channel with obstacles

V. M. Temerbekov, D. A. Tropin

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russia

2-48. Исследование распространения детонации в клиновидных образцах взрывчатых веществ на основе ТАТБ и октогена

А. Е. Тепляков, А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин, И. Г. Галиуллин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-48. Investigation of detonation propagation in TATB- and HMX-based wedge explosive samples

A. E. Teplyakov, A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, K. M. Prosvirnin, I. G. Galiullin

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-49. Калибровка уравнения состояния продуктов взрыва пластифицированного октогена на результатах опытов по разгону лайнеров

В. Б. Титова¹, Н. А. Володина¹, М. О. Ширшова¹, М. Н. Кирюхина¹, Е. Н. Богданов², А. А. Становов²

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Институт теоретической и математической физики, Саров, Россия

²Институт физики взрыва, Саров, Россия

2-49. Proving the equation of state for the explosion products of plasticized HMX using the experimental results on liners acceleration

V. B. Titova¹, N. A. Volodina¹, M. O. Shirshova¹, M. N. Kiryuhina¹, E. N. Bogdanov², A. A. Stanovov²

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics", ITMP, Sarov, Russia

²FSUE "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics", IPE, Sarov, Russia

2-50. Исследование возможности получения пучков синхротронного излучения с наноразмерным сечением для исследования структуры детонационного фронта на источнике фотонов СКИФ: модельный эксперимент на ВЭПП-4 с использованием рефракционных рентгеновских линз

Б. П. Толочко^{3,4}, Н. И. Разумов^{3,4}, В. П. Назьмов³, К. А. Тен^{1,3}, Э. Р. Прууэл¹, И. А. Рубцов^{1,2}, Л. И. Шехтман³, А. Ю. Гармашев⁵, Д. В. Петров⁵, Е. Б. Смирнов⁵

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-50. Investigation of the possibility of obtaining synchrotron radiation beams with a nanosized cross section for studying the structure of the detonation front at the SKIF photon source: model experiment at VEPP-4 using refractive X-ray lenses

B. P. Tolochko^{3,4}, N. I. Razumov^{3,4}, V. P. Nazmov³, K. A. Ten^{1,3}, E. R. Prueel¹, I. A. Rubtsov^{1,2}, L. I. Shekhtman³, A. Yu. Garmashev⁵, D. V. Petrov⁵, E. B. Smirnov⁵

¹Institute of Hydrodynamics, M. A. Lavrentiev SB RAS, Novosibirsk, Russia

²TsKP "SKIF", Institute of Catalysis. G. K. Boreskov SB RAS, Koltsovo, Russia

³Institute of Nuclear Physics, G. I. Budker SB RAS, Novosibirsk, Russia

⁴Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁵Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics named after Academician. E. I. Zababakhina", Snezhinsk, Russia

2-51. Взаимодействие ячеистой детонации в смесях водород – воздух и водород – кислород – аргон с инертными фильтрами

Д. А. Тропин, К. А. Вышегородцев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

2-51. Interaction of cellular detonation in hydrogen–air and hydrogen–oxygen–argon mixtures with inert filters

D. A. Tropin, K. A. Vyshegorodcev

Khristianovich institute of theoretical and applied mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

2-52. Определение параметров детонации тротила с помощью лазерной гетеродинной методики

А. С. Туманик, К. А. Тен, Э. Р. Прууэл,

Н. П. Сатонкина

ФГБУН «Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН», Новосибирск, Россия

2-52. Determination of TNT detonation parameters using Photon Doppler velocimetry

A. S. Tumanik, K. A. Ten, E. R. Prueel, N. P. Satonkina

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

2-53. Управление процессом горения сгорающих изделий для минометных и артиллерийских выстрелов в жестких сгорающих картузах

Р. В. Фаталиев, С. В. Солдатов, А. Ю. Осипова, Т. А. Енейкина, Р. Ф. Гатина, Ю. М. Михайлов

ФКП Научно-исследовательский институт химических продуктов, Казань, Россия

2-53. Control of the combustion process of combustible product for mortar and artillery shots in combustible cartridge cases

R. V. Fataliev, S. V. Soldatov, A. Yu. Osipova, T. A. Eneikina, R. F. Gatin, M. Yu. Mikhailov

Research Institute of Chemical Products Federal State Enterprise, Kazan, Russia

2-54. Измерение давления и импульса давления в ударной волне мембранным крешером

К. В. Хаиртденов, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин, И. Г. Галиуллин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-54. Shock-wave pressure and pressure pulse measurements using a membrane crusher

K. V. Khairtdenov, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, K. M. Prosvirnin, I. G. Galiullin

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-55. Расчетно-экспериментальное определение давления продуктов взрыва гексогена применительно к конструкции защитного размыкателя систем электропитания уникальных электрофизических установок

Д. И. Алексеев, М. В. Манзук, А. Н. Паученко, В. В. Харченко

Акционерное общество «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

2-55. Design-experiment determination of the pressure of hexogen explosion products as applied to the design of the protective make switch of power supply systems of unique electrophysical installations

D. I. Alekseev, M. V. Manzuk, A. N. Pauchenko, V. V. Kharchenko

Joint Stock Company "D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus", St. Petersburg, Russia

2-56. Регистрация детонационного синтеза наночастиц металлов рентгенографическим и микроскопическим методами

Н. А. Хлебновский¹, А. О. Кашкаров², К. А. Тэн², Е. Ю. Герасимов³, Б. Л. Мороз³

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

³Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

2-56. Registration of detonation synthesis of metal nanoparticles by X-ray and microscopic methods

N. A. Khlebnovskiy¹, A. O. Kashkarov², K. A. Ten², E. Y. Gerasimov³, B. L. Moroz³

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Boreskov Institute of Catalysis, SB RAS, Novosibirsk, Russia

2-57. Влияние добавок частиц алюминия на детонационные характеристики водород-кислородных смесей

Т. А. Хмель

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

2-57. Effect of additive aluminum particles on the detonation characteristics of hydrogen-oxygen mixtures

T. A. Khmel

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SD RAS, Novosibirsk, Russia

2-58. Новые дифтораминасодержащие производные фуразана: синтез и оценка энергетических свойств

Д. Л. Чижов¹, Ю. А. Квашнин¹, А. В. Станкевич², П. А. Слепухин¹, Г. Л. Русинов¹, В. Н. Чарушин¹

¹Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-58. New difluoramino-containing furazan derivatives: synthesis and evaluation of energy properties

D. L. Chizhov¹, Yu. A. Kvashnin¹, A. V. Stankevich², P. A. Slepukhin¹, G. L. Rusinov¹, V. N. Charushin¹

¹Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

²Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All – Russia Research Institute of technical Physics

2-59. Определение параметров детонации тонких слоев пластичных взрывчатых веществ

С. В. Шахмаев, Д. М. Гагаркин, К. В. Еганов, А. В. Клепинин, Р. Н. Латыпов, А. В. Сарафанников, Е. Б. Смирнов

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-59. Determination of detonation parameters for thin layers of plastic high explosives

S. V. Shakhmaev, D. M. Gagarkin, K. V. Eganov, A. V. Klepinin, R. N. Latypov, A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-60. Особенности распространения детонации в каналах малого сечения для состава на основе ТЭН

В. Б. Титова, Н. А. Володина, М. О. Ширшова, И. А. Спирин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров, Россия

2-60. Characteristics of detonation wave's propagation in channels of a small cross-section for PETN-based compound

V. B. Titova, N. A. Volodina, M. O. Shirshova

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics", Sarov, Russia

2-61. Регистрация переходного процесса при иницировании ТАТБ через инертную преграду

А. А. Студенников^{1,2}, И. А. Рубцов^{1,2}, Э. Р. Прууэл², К. А. Тен², А. О. Кашкаров², В. П. Халемчук², А. К. Музыря³, Е. Б. Смирнов³, К. М. Просвирнин³, И. Г. Галиуллин³, К. В. Еганов³, А. С. Гремитских³

¹ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

³ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

2-61. Synchrotron radiation methods for registration of transient process of TATB initiation through an dense barrier

A. A. Studennikov^{1,2}, I. A. Rubtsov^{1,2}, E. R. Pruuel², K. A. Ten², A. O. Kashkarov², V. P. Xalemenchuk², A. K. Myzirya³, E. B. Smirnov³, K. M. Prosvirnin³, I. G. Galiullin³, K. V. Eganov³, A. S. Gremitskich³ 117

¹Synchrotron radiation facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

³FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

2-62. Эффект сенсibilизации высокоэнергетических композиций при электромеханическом воздействии

Л. Х. Бадретдинова, Р. М. Вахидов, А. С. Куражов, Д. В. Метляков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия

2-62. The effect of sensitization of high-energy compositions under electromechanical action

L. Kh. Badretdinova, R. M. Vakhidov, A. S. Kurazhov, D. V. Metlyakov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technological University», Kazan, Russia

2-1

МОДЕЛЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И РОСТА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО УДАРНОМУ ИНИЦИИРОВАНИЮ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ГЕКСАНИТРОСТИЛЬБЕНА (ГНС-IV)

Вэй Цао, Вэй Го, Ша Ян, Цингуань Сун, Бин Хуан, Юн Хань

Институт химических веществ, Китайская академия инженерной физики, Мянъян, Китай

E-mail: weicao@caep.cn

Гексанитrostильбен (ГНС) является устойчивым к нагреванию взрывчатым веществом (ВВ), широко используемым в качестве промежуточного детонатора или инициирующего заряда, в особенности в слэппер-детонаторах, в которых детонация осуществляется в результате ударного воздействия летящей пластины на ВВ. Существует несколько форм ГНС (I-V), отличающихся друг от друга размером частиц и степенью чистоты. ГНС-IV выделяется в виде осадка в результате разрушения ГНС-II, рекристаллизованного из ГНС-I. Плотность кристаллов ГНС в настоящей работе составляет $1,74 \text{ г/см}^3$ при пористости 8%, хотя, как правило, используется ГНС с плотностью приблизительно $1,60 \text{ г/см}^3$. Для получения таких составов, как LX-15 (ГНС 95% и Kel F-800 5%) [1] с улучшенными формообразующими свойствами, в ВВ добавляются связующие.

В своем исследовании Кэмпбелл и соавторы [2] описывают ударное инициирование твердых ВВ. Для изучения процесса ударного инициирования твердых ВВ проводились испытания с использованием плосковолновых линз, снарядов, прутков, летящих пластин и др. В рамках параметрического исследования ударного инициирования измерения светового выхода в клиновых испытаниях, массовой скорости и давления между пластинами ВВ выполняются в основном при помощи высокоскоростной камеры с вращающимися зеркалами, электромагнитных датчиков скорости частиц и манганиновых датчиков давления. Для измерения детонации и ударной волны с помощью микроволн, лазерного излучения и терагерцевых волн в последнее время широко применяется доплерометрия.

В рамках данного исследования с целью изучения плосковолнового инициирования детонации ВВ на основе ГНС-IV (ГНС-IV 97,5% и связующее 2,5%, $\rho_0 = 1,58 \text{ г/см}^3$), при помощи фотонной доплерометрии выполнялось измерение скорости границы раздела между зарядом образца и окном из фторида лития (LiF). Для образования плоской ударной волны использовалась плосковолновая линза $\varnothing 100$ и образцы ВВ на основе октогена $\varnothing 100 \times 20$ (октоген 95% и связующее 5%, $\rho_0 = 1,857 \pm 0,002 \text{ г/см}^3$). В качестве аттенюаторов использовались вольфрамовая (W95NiFe) и алюминиевая (2A12) пластины. Затем к алюминиевой пластине-аттенюатору прикреплялись заряды образца $\varnothing 10$. Для получения большего количества данных за одно испытание к пластине можно было прикреплять до шести зарядов образцов с различной толщиной, равномерно распределенных по длине окружности $\varnothing 30$ (см. рис. 1). В данном случае на пластине прикреплялись четыре заряда толщиной 1, 3, 5 и 7 мм, а на оставшихся двух свободных местах измерялась скорость свободной поверхности. На другой стороне заряда образца располагалось окно LiF $\varnothing 10 \times 5$. Для создания отражающей поверхности на верхнюю поверхность этого окна со стороны ВВ была нанесена алюминиевая фольга толщиной 0,6 мкм. Этот алюминиевый слой является достаточно тонким, его полное ударное сопротивление аналогично полному сопротивлению окна LiF, поэтому возмущения в динамике скорости границы раздела являются незначительными.

Благодаря изменению толщины аттенюаторов, были получены различные амплитуды ударной волны. Кроме того, были получены скорость свободной поверхности алюминиевой пластины и истинная скорость границы раздела между зарядом образца и окном LiF. Скорость свободной поверхности может использоваться для расчета выходного давления ударной волны. Для формирования динамики истинной скорости границы раздела необходимо скорректировать полученную динамику видимой скорости границы раздела с учетом показателя преломления окна LiF.

В модели воспламенения и роста для реактивного потока используются два уравнения состояния Джонса–Уилкинса–Ли (JWL): одно уравнение – для непрореагировавшего ВВ, а другое – для

продуктов реакции. Выполняется подгонка этих уравнений к данным ударных адиабат непрореагировавшего ВВ и продуктов реакции. В описываемом случае применяется трехчленное уравнение скорости реакции. Предполагается, что давление и температура между двумя фазами непрореагировавшего и прореагировавшего ВВ находятся в равновесии.

Итак, была выполнена подгонка уравнения состояния JWL для непрореагировавшего ВВ к данным эксперимента. Уравнение состояния JWL для продуктов реакции должно прогнозировать данные о расширении ниже давления Чепмена–Жуге (Ч–Ж) и пересжатые состояния ударной адиабаты выше состояния Ч–Ж. На рис 2. демонстрируется сравнение параметров скорости реакции с данными эксперимента, а также уравнения состояния JWL для непрореагировавшего ВВ и продуктов реакции. Показано согласие между экспериментальной и расчетной массовыми скоростями границы раздела. Все параметры представлены в табл. 1.

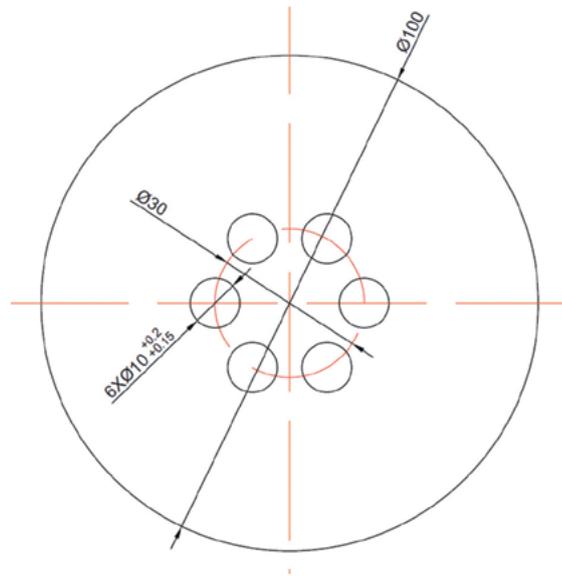


Рис. 1. Постановка эксперимента: граница раздела между алюминиевым аттенуатором (Ø100) и зарядами образца (Ø10)

Таблица 1

Параметры модели воспламенения и роста
для ВВ ГНС-IV/связующее = 97,5/2,5, плотность 1,58 г/см³

Уравнение состояния JWL для непрореагировавшего ВВ	Уравнение состояния JWL для продуктов реакции	Параметры скорости реакции
$A = 8090$ Мбар	$A = 3,306$ Мбар	$A = 1,4e + 6$ мкс ⁻¹ $x = 8,0$
$B = -0,01522$ Мбар	$B = 0,1251$ Мбар	$b = 0,667$ $F_{G1max} = 0,3$
$R_1 = 16,55$	$R_1 = 4,324$	$a = 0,05$ $G_2 = 2000$ Мбар ⁻³ ·мкс ⁻¹
$R_2 = 1,655$	$R_2 = 1,289$	$y = 2,0$ $z = 3,0$
$\omega = 0,5226$	$\omega = 0,2775$	$F_{igmax} = 0,08$
$C_V = 2,704e - 5$ Мбар·К ⁻¹	$C_V = 1,0e - 5$ Мбар·К ⁻¹	$G_1 = 600$ Мбар ⁻² ·мкс ⁻¹ $F_{G2min} = 0,8$
$T_0 = 298$ К	$E_0 = 0,060$ Мбар	$c = d = e = g = 0,667$

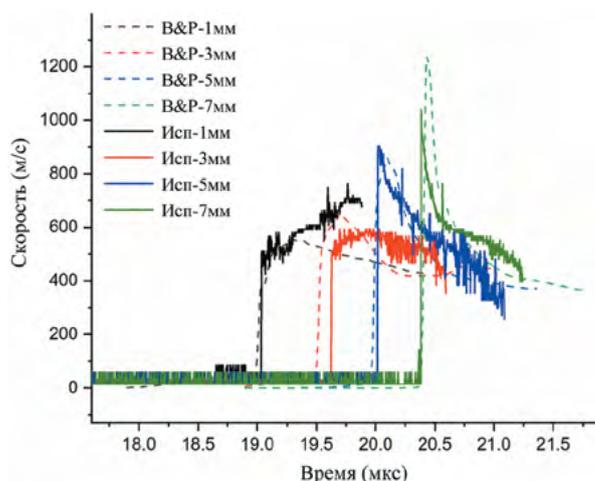


Рис. 2. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных

Литература

1. **Stull, T. W.** Formulation of custom sized LX-15 granules [Text]. – US : MHSMP-80-19, 1980.
2. **Campbell, A. W.** Shock initiation of solid explosives [Text] / A. W. Campbell, W. C. Davis, J. B. Ramsay, J. R. Travis // Phys. Fluids. – 1961. – Vol. 4. – P. 511–521.

IGNITION AND GROWTH MODELING OF PLANE WAVE SHOCK INITIATION EXPERIMENTS ON ULTRAFINE HEXANITROSTILBENE (HNS-IV)

Wei Cao, Wei Guo, Sha Yang, Qingguan Song, Bing Huang, Yong Han

Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, China

E-mail: weicao@caep.cn

Hexanitrostilbene (HNS) is a heat-resistant booster explosive that is widely used in initiators, especially in slapper detonators, where explosives are impacted by thin flyer plates. HNS has been produced in several forms (I-V) with various particle sizes and purities. HNS-IV is crash precipitated from HNS-II, which was recrystallized from HNS-I. The crystal density of HNS is 1.74 g/cm^3 , while it is generally used at density of around 1.60 g/cm^3 , which implies a porosity of 8%. In order to improve the shaping performance of HNS, binders are added to form formulations such as LX-15 (95% HNS I and 5% Kel F-800) [1].

The shock initiation of solid explosives has been discussed by Campbell et al [2]. In order to study the shock initiation process of solid explosives, plane wave lens, projectile, rod, flyer plate and etc. have been used in experiments. In the parametric study of shock initiation, the light output in wedge test, particle velocity and pressure between explosive slabs are usually measured by high-speed rotating camera, electromagnetic particle velocity gauge and manganin pressure gauges. Recently, the Doppler velocimetry has been widely used in detonation and shock wave measurements, where microwaves, laser, terahertz waves are commonly used.

In this work, the interface velocity between sample charge and LiF window was measured by photonic Doppler velocimetry, to investigate the plane wave shock initiation of HNS-IV based explosive (97.5% HNS-IV and 2.5% binder, $\rho_0 = 1.58 \text{ g/cm}^3$). The $\Phi 100$ plane wave lens and was $\Phi 100 \times 20$ HMX-based explosive (95% HMX and 5% binder, $\rho_0 = 1.857 \pm 0.002 \text{ g/cm}^3$) used to produce plane shock wave, which was attenuated by tungsten (W95NiFe) and aluminum (2A12) plates. Then the $\Phi 10$ sample charges were attached to the aluminum attenuator plate. In order to obtain more data in one shot, up to six sample charges with varying thicknesses could be mounted simultaneously, which were evenly distributed along the $\Phi 30$ circumference (as shown in fig.1). Four charges with thicknesses of 1, 3, 5, 7 mm were mounted here, and the other two locations could be used for free surface velocity measurement. The $\Phi 10 \times 5$ LiF window was amounted

to the other end of sample charge. A 0.6- μm -thick aluminum foil was deposited on the window face next to the explosive to provide a reflective surface. The aluminum layer is thin enough and has a shock impedance close to that of LiF window to introduce negligible perturbations into the interface velocity histories.

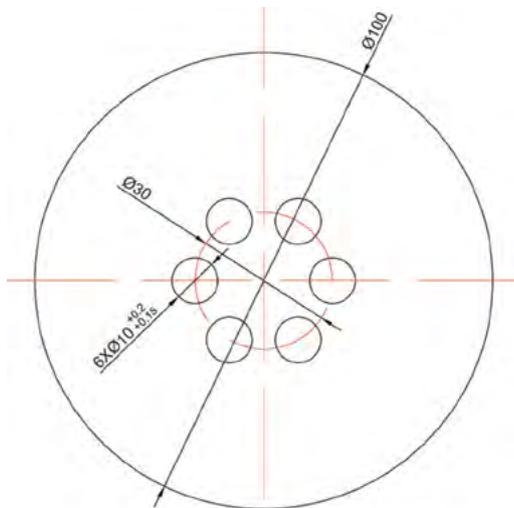


Fig. 1. The experimental setup of interface between aluminum attenuator ($\Phi 100$) and sample charges ($\Phi 10$)

By changing the thickness of attenuators, different amplitudes of shock waves could be obtained. The free surface velocity of aluminum plate and true interface velocity between sample charge and LiF window were obtained. The free surface velocity could be used to calculate the output pressure of shock wave. The obtained apparent interface velocity histories should be corrected for the index of refraction of LiF to generate true interface velocity histories.

The ignition and growth reactive flow model uses two Jones–Wilkins–Lee (JWL) equations of state (EOS's), one for unreacted explosive and one ofr reaction products. These EOS's are fitted to unreacted Hugoniot and reaction product Hugoniot data. The three-term reaction rate equation is used. Pressure and temperature equilibration between the two phases of unreacted and reacted explosive are assumed.

The unreacted JWL EOS was fitted to experimental data. The product JWL EOS must predict expansion data below the Chapman–Jouguet (C–J) pressure plus overdriven Hugoniot states above the C–J state. Together with the unreacted JWL EOS and the product JWL EOS, the reaction rate parameters are compared to the experimental in fig. 2. Fig. 2 shows the agreement between the experimental and calculated interface particle velocity. All the parameters are given in Table 1.

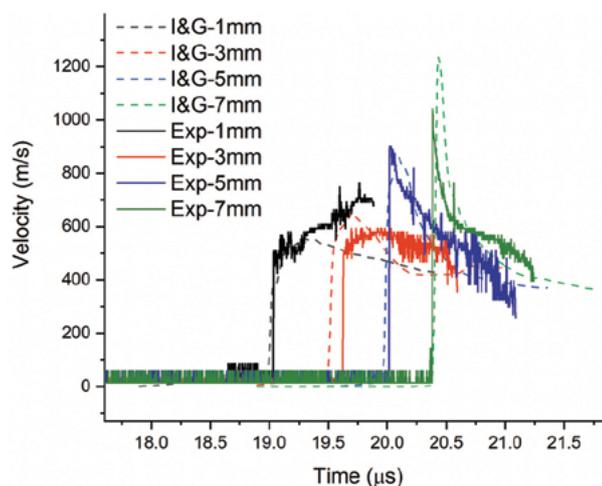


Fig. 2. Comparison between experimental and calculated data

Table 1

Ignition and growth model parameters
for HNS-IV/binder = 97.5/2.5 with density = 1.58 g/cm³

Unreacted JWL EOS	Product JWL EOS	Reaction rate parameters
$A = 8090 \text{ Mbar}$	$A = 3.306 \text{ Mbar}$	$A = 1.4e + 6\mu\text{s}^{-1}$ $x = 8.0$
$B = -0.01522 \text{ Mbar}$	$B = 0.1251 \text{ Mbar}$	$b = 0.667$ $F_{G1max} = 0.3$
$R_1 = 16.55$	$R_1 = 4.324$	$a = 0.05$ $G_2 = 2000 \text{ Mbar}^{-3} \cdot \mu\text{s}^{-1}$
$R_2 = 1.655$	$R_2 = 1.289$	$y = 2.0$ $z = 3.0$
$\omega = 0.5226$	$\omega = 0.2775$	$F_{igmax} = 0.08$
$C_V = 2.704e - 5 \text{ Mbar} \cdot \text{K}^{-1}$	$C_V = 1.0e - 5 \text{ Mbar} \cdot \text{K}^{-1}$	$G_1 = 600 \text{ Mbar}^{-2} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ $F_{G2min} = 0.8$
$T_0 = 298\text{K}$	$E_0 = 0.060 \text{ Mbar}$	$c = d = e = g = 0.667$

References

1. **Stull, T. W.** Formulation of custom sized LX-15 granules [Text]. – US : MHSMP-80-19, 1980.
2. **Campbell, A. W.** Shock initiation of solid explosives [Text] / A. W. Campbell, W. C. Davis, J. B. Ramsay, J. R. Travis // Phys. Fluids. – 1961. – Vol. 4. – P. 511–521.

2-2

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС НАНОГЕЙТ-22/ПАК. КАЛИБРОВКА, КОРРЕКЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА В КАЧЕСТВЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

М. И. Крутик¹, В. А. Аринин², Б. И. Ткаченко², С. В. Дудин³

¹ООО «Научно-производственное предприятие НАНОСКАН», Москва, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров, Россия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

В докладе представлены основные технические характеристики и результаты применения программно-аппаратного комплекса Наногейт-22/ПАК, разработанного в ООО «НПП НАНОСКАН».

Основой комплекса является восьми канальная 16-ти кадровая электронно-оптическая камера, предназначенная для высокоскоростной регистрации оптических изображений быстропротекающих процессов в нано- и микросекундном диапазонах времени. Внешний вид камеры показан на рис. 1 слева. Регистрируемое изображение, проходя через входной объектив, попадает на пирамидальную зеркальную систему светоделения на восемь каналов. Аппаратный состав канала: затвор – планарный электронно-оптический преобразователь (ЭОП) Ø18 мм; перенос изображения – оптический, масштаб переноса 1:1, апертура 18°; сенсор – чересстрочная ПЗС матрица размером 15,4×15,4 мм,

2048×2048 элементов. Чувствительность каждого канала регулируется независимо, что позволяет изучать процессы с большим диапазоном яркости. Каждый из восьми каналов регистрирует два кадра, параметры которых устанавливаются независимо как по времени экспозиции (5 нс÷20 мкс), так и по межкадровому интервалу (5 нс÷1000 мкс). Каждый канал может работать в режиме стробоскопа, регистрируя несколько фаз процесса на один кадр. Квантовая эффективность регистрации определяется исключительно фотокатодом ЭОП, так как каждый выбитый из него фотоэлектрон участвует в формировании конечного изображения.



Рис. 1. Слева – Камера «Наногейт 22/16», справа – регистрация процесса детонации, 12 кадров из 16-ти

Используемая в камере система светоделения изображения обладает рядом недостатков: неравномерность экспозиции по полю изображения из-за виньетирования кадров; межканальный параллакс: каждый канал регистрирует процес хоть и с близких друг к другу, но с разных точек; заметная дисторсия оптической пары входной объектив – объектив переноса. В программной части комплекса Наногейт-22/ПАК предусмотрена автоматическая калибровка и коррекция вышеперечисленных аппаратных искажений.

Современные алгоритмы анализа и обработки изображений, реализованные в программном обеспечении (ПО) комплекса, не привязаны к пиксельной структуре получаемых изображений и обеспечивают ориентацию, масштабирование и кадрирование полученных изображений с точностью, имеющей лишь фундаментальные ограничения – число квантов, образующих изображение. Метрологическая часть ПО позволяет трассировать границы разных типов (строить векторную линию по растровым данным), измерять углы ориентации протяженных объектов, определять параметры симметрии, расстояние между подобными объектами, проводить другие типы измерений. По полученным векторным данным можно определять площади, объемы, расстояния, смещения и прочие морфологические параметры изучаемых процессов.

Опыт применения комплекса Наногейт-22/ПАК в Институте проблем химической физики РАН (ИПХВ РАН), г. Черноголовка, показал его высокую эффективность при изучении высокоскоростных нестационарных процессов в детонационных и ударных волнах (ДВ и УВ), а так же проблем физики высоких плотностей энергии и свойств вещества и плазмы при высоких динамических давлениях. Пример получаемых при этом изображений приведен на рис. 1 справа.

Для исследования таких процессов в ИПХФ РАН была разработана лабораторная установка [1], где цилиндрическая ДВ формируется многоточечным инициированием. Высокое пространственное и временное разрешение комплекса Наногейт-22/ПАК позволило определить сложную структуру ДВ, сохраняющую свои особенности до полного схождения. Эксперименты по формированию цилиндрической детонационной волны по сжатию аргона [2] обработаны с применением ПО комплекса. Измеренные скорости ДВ и УВ в исследуемых средах совпали с точностью 0,5% с расчетными значениями. По полученным векторным данным была определена динамика изучаемых процессов. В докладе приведено множество других результатов анализа экспериментальных данных с применением ПО комплекса, в том числе и о развитии гидродинамических неустойчивостей.

Литература

1. Дудин, С. В. Взрывная лабораторная установка для цилиндрического сжатия [Текст] / С. В. Дудин, В. А. Сосиков, С. И. Торунов // Физика горения и взрыва. – 2019. – Т. 55, № 4.
2. Дудин, С. В. Сжатие аргона на лабораторной модельной установке [Текст] / С. В. Дудин, В. А. Сосиков, С. И. Торунов // XVI Всероссийский симпозиум по горению и взрыву, Суздаль, 4–9 сентября, 2022.

THE NANOGATE-22/HSC HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX. CALIBRATION, CORRECTION OF DISTORTIONS AND RESULTS OF APPLICATION AS A MEASURING INSTRUMENT OF THE SPATIO-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF HIGH SPEED PROCESSES

M. I. Krutik¹, V. A. Arinin², B. I. Tkachenko², S. V. Dudin³

¹NANOSCAN Scientific and Production Enterprise Moscow, Russia

²FSUE “Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics”, Sarov, Russia

³Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

The report presents the main technical characteristics and results of the application of the Nanogate-22/HSC hardware and software complex developed by NANOSCAN.

The basis of the complex is an eight-channel 16-frame electron-optical camera designed for recording of optical images of high-speed processes in the nano- and microsecond time ranges. The photo of the camera is shown in fig. 1 on the left. The recorded images, passing through the input lens, falls on a pyramidal mirror beam-splitting system with eight channels. Hardware composition of the channel: shutter – electron-optical converter (EOC) $\varnothing 18$ mm with microchannel plate amplifier; image transfer lens with scale 1:1 and aperture 18° ; sensor – interlaced CCD matrix, size 15.4×15.4 mm, 2048×2048 elements. The sensitivity of each channel is adjusted independently, which allows you to study processes with a large dynamic range of brightness. Each of the eight channels registers two frames, its parameters are set independently both in terms of exposure time ($5 \text{ ns} \div 20 \mu\text{s}$) and in the inter-frame interval ($5 \text{ ns} \div 1000 \mu\text{s}$). Each channel can operate in strobe mode, registering several phases of the process per frame. The quantum efficiency of registration is determined exclusively by the EOC photocathode, since each photoelectron knocked out of it takes part in the final image formation.

The image beam-splitting system used in the camera has a number of disadvantages: uneven exposure across the image field due to frame vignette; inter-channel parallax: each channel registers the process, albeit from close to each other, but from different points; noticeable distortion of the optical pair of the input lens – transfer lens. The software part of the Nanogate-22/HSC complex provides automatic calibration and correction of the above-mentioned hardware distortions.



Fig. 1. On the left – camera NANOGATE 22/16, on the right – registration of the detonation process, 12 frames from 16

Modern image analysis and processing algorithms implemented in the software of the complex are not tied to the pixel structure of the images obtained and provide orientation, scaling and cropping of the images with an accuracy that has only fundamental limitations – the number of quanta forming the image. The metrological part of the software allows tracing boundaries of different types (building a vector line from raster data), measuring orientation angles of extended objects, determining symmetry parameters, the distance between similar objects, and performing other types of measurements. According to the vector data obtained, it is possible to determine the areas, volumes, distances, displacements and other morphological parameters of the studied processes.

The experience of using the Nanogate-22/HSC complex at the Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, has shown its high efficiency in studying high-speed unsteady processes in detonation and shock waves (DV and ShV), as well as problems of physics of high energy densities and properties of matter and plasma at high dynamic pressures. An example of the images obtained in this case are shown in Fig. 1 on the right.

To study such processes, a laboratory installation was developed at the IPCF RAS [1], where a cylindrical DV is formed by multipoint initiation. The high spatial and temporal resolution of the Nanogate-22/HSC complex made it possible to determine the complex structure of the DV, which retains its features until complete convergence. Experiments on the formation of a cylindrical detonation wave by compression of argon [2] were processed using the software complex. The measured velocities of DV and ShV in the studied media coincided with an accuracy of 0.5% with the calculated values. Based on the vector data obtained, the dynamics of the studied processes was determined. The report presents many other results of the analysis of experimental data using the software complex, including the development of hydrodynamic instabilities.

References

1. **Dudin, S. V.** Explosive laboratory installation for cylindrical compression [Text] / S. V. Dudin, V. A. Sosikov, S. I. Torunov // Physics of Gorenje and Explosion. – 2019. – Vol. 55, No. 4.
2. **Dudin, S. V.** Compression of argon on laboratory model installation [Text] / S. V. Dudin, V. A. Sosikov, S. I. Torunov, M. I. Kulish // XVI All-Russian Symposium on Gorenje and Explosion, Suzdal, September 4–9, 2022.

2-3

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

М. Ф. Ахметов

Филиал ООО «Мелитэк», Екатеринбург, Россия

Одной из важнейших задач методов термического анализа является исследование стабильности взрывчатых веществ. Термогравиметрический анализ (ТГА), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) и дифференциальный термический анализ (ДТА) могут быть использованы для мониторинга состояния готовых материалов в сравнении с контрольными образцами и установления причин возникновения изменений. Оценка стабильности и прогнозирование сроков хранения проводится на основе определения температур стеклования, начала и окончания химической реакции, плавления и тепловых эффектов, изменения веса. Дополнительно может быть использован дилатометрический анализ для отслеживания геометрических параметров и изменения термического коэффициента линейного расширения.

Все исследования могут быть проведены в условиях контролируемого содержания водяного пара, компонентов воздуха и других веществ, а также при контакте с твердыми материалами, например корпусом изделия или упаковкой.

APPLICATION OF THERMAL ANALYSIS METHODS TO DETERMINE THE STABILITY OF EXPLOSIVES

M. F. Akhmetov

Branch of Melytec LLC, Yekaterinburg, Russia

One of the most important tasks of thermal analysis methods is the study of the stability of explosives. Thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), and differential thermal analysis (DTA) can be used to monitor the condition of finished materials in comparison with control samples and establish the causes of changes. Stability assessment and forecasting of shelf life is carried out based on determining the determination of finished materials in comparison with control samples. Stability assessment and forecasting of shelf life glass transition temperatures, the beginning, and end of the chemical reaction, melting and thermal effects, and weight changes. Additionally, dilatometric analysis can be used to track geometric parameters and changes in the thermal coefficient of linear expansion.

All studies can be carried out under conditions of controlled water vapor, air components, and other substances, as well as in contact with solid materials, such as the case of the product or packaging.

2-4

ОСЛАБЛЕНИЕ МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА С ПОМОЩЬЮ ГРАНУЛИРОВАННОГО ОСЛАБИТЕЛЯ

С. В. Балушкин, А. Ю. Симонов, Г. В. Куликов, М. В. Никифоров

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

В ряде технологических процессов в качестве воздействия на заготовку используется взрыв [1]. Ослабление взрывного воздействия на технологические заготовки в этом случае имеет важное значение, так как прямое воздействие детонации взрывчатого вещества может привести к формированию паразитических эффектов, делающих изготавливаемое изделие не кондиционным, таких как откол, фрагментация или коробление поверхности.

Одним из самых эффективных способов ослабления прямого воздействия взрыва является демпфирование ударной волны гранулированными средами [2]. В данном докладе будет представлено исследование демпфирования ударной волны гранулированными средами на примере ослабления метательной способности взрывчатого вещества с помощью калиброванного песка. Авторами были проведены опыты по ударноволновому нагружению цилиндрических оболочек из конструкционных материалов с регистрацией процесса схождения высокоскоростной съемкой.

В опытах цилиндрические оболочки $\varnothing 60 \times 8$ из меди М1 и стали Ст20 нагружались с помощью подрыва взрывчатого вещества ТЭН, инициируемого в 32 точках по торцу слоя. Между металлическими оболочками и слоем взрывчатого вещества присутствовал ослабитель из калиброванного песка. Снаружи размещался подпор из стального цилиндра толщиной 20 мм. Схема опытного образца представлена на рис. 1.

Для оценки скорости оболочки при нагружении без ослабителя воспользуемся модифицированным уравнением Генри для цилиндрической имплозии [3]:

$$\vartheta = k \left[A \left[\frac{M}{C} + \frac{\beta + 3}{6(\beta + 1)} \right] + A \left[\frac{N}{C} + \frac{\beta + 1}{6(\beta + 1)} \right] - \frac{1}{3} \right]^{-0,5},$$

где $A = \frac{\frac{M}{C} + \alpha(\beta - 1)\frac{M}{C} + \frac{\beta + 2}{3(\beta + 1)}}{\frac{N}{C} + \frac{2\beta + 1}{3(\beta + 1)}}$ – соотношение скоростей внешней и внутренней стенок; C – масса

взрывчатого вещества, г; M – масса оболочки, г; N – масса подпора, г; $k = 0,33D$ – константа Генри, характеризующая метательную способность ВВ; $\beta = r_o/r_i$ – отношение внешнего и внутреннего радиусов ВВ; $\alpha = 1$ – коэффициент для цилиндрической имплозии.

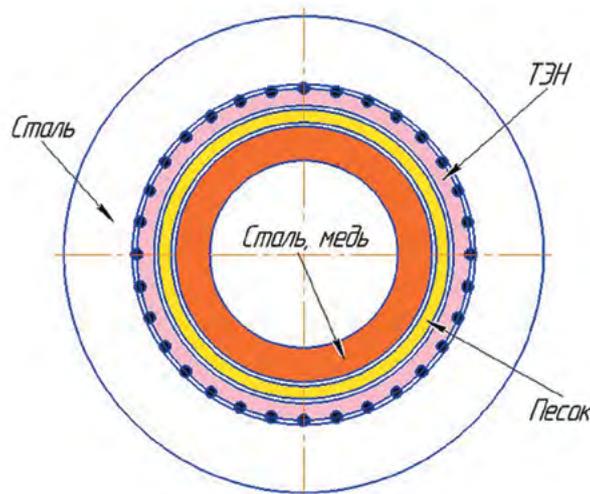


Рис. 1. Схема опытного образца

В опытах перемещение внутренней поверхности регистрировалось с помощью высокоскоростной видеокамеры. Преимуществом этого метода регистрации схождения цилиндрических оболочек является отсутствие преград и возмущений на пути движущейся внутренней поверхности оболочки. Результаты съемки обрабатывались в фотографических программах методом обмеров. На рис. 2 представлен пример полученных изображений при съемке с частотой кадров 460 000 к/с.

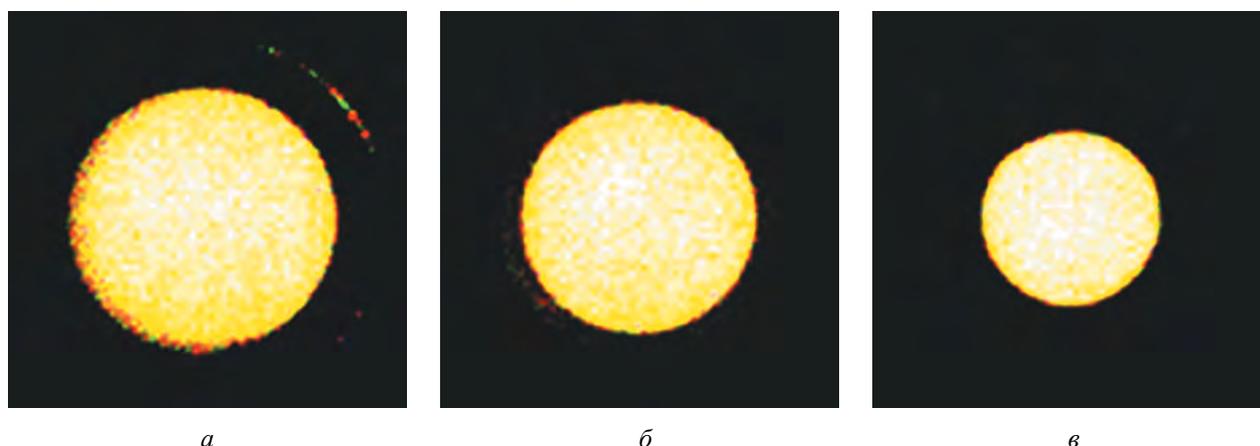


Рис. 2. Кадры видеосъемки смыкания медной оболочки в опыте:

$a - t_0$; $б - t_0 + 10,9$ мкс; $в - t_0 + 32,6$ мкс

В докладе выполнено сравнение скоростей схождения оболочек без ослабителя, полученных расчетно, со скоростями тех же оболочек, но с ослабителем из песка, полученными экспериментально. Показано, что ослабитель из песка эффективно снижает ударноволновое воздействие на оболочку

и ослабляет метательную способность бризантных взрывчатых веществ за счет диссипации энергии ударной волны при ее движении в гранулированной среде.

Литература

1. **Кобылкин, И. Ф.** Взрывные технологии: учебно-методическое пособие [Текст]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019.
2. **Grujicic, M.** Shock-Wave Attenuation and Energy-Dissipation Potential of Granular Materials [Text] / M. Grujicic, B. Pandurangan, W. C. Bell, S. Bagheri // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2012. – Vol. 21, No. 2. – P. 167–179.
3. **Hirsh, E.** Simplified and Extended Gurney Formulas for Imploding Cylinders and Spheres [Text] // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 1986. – Vol. 11, No. 1. – P. 6–9.

WEAKENING OF THE PROPELLING CAPACITY OF AN HE BY MEANS OF A GRANULAR ATTENUATOR

S. V. Balushkin, A. Yu. Simonov, G. V. Kulikov, M. V. Nikiforov

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

In a number of processing procedures, an explosion is used to impact a billet [1]. In this case, weakening of the explosive impact on technological billets is an important issue, since the direct exposure of billets to explosive detonation can lead to the development of parasitic effects, such as spallation, fragmentation, or surface distortion, resulting in a substandard manufactured product.

One of the most effective ways to weaken the direct impact of an explosion is to damp the shock wave by granular media [2]. We present the results of the study of shock wave damping by means of granular media by the example of weakening of the propelling capacity of an HE using calibrated sand. The authors carried out experiments on shock wave loading of cylindrical shells made of structure materials with recording the implosion process by high-speed shooting.

In the experiments, $\varnothing 60 \times 8$ cylindrical shells made of copper M1 and steel St20 were loaded by explosive detonation of PETN, initiated in 32 points along the end face of the PETN layer. A calibrated sand attenuator was placed between the metal shells and the HE layer. The prototype was installed on a support in the form of a 20 mm-thick steel cylinder. Figure 1 shows the layout of the prototype.

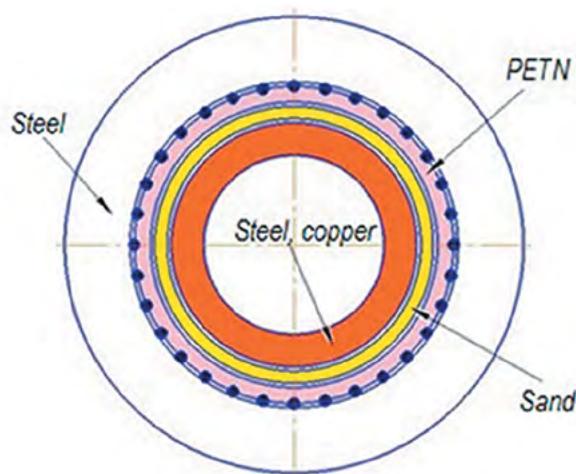


Fig. 1. Layout of the prototype

To estimate the velocity of the shell loaded without the attenuator, we use the modified Henry equation for cylindrical implosion [3]:

$$\vartheta = k \left[A \left[\frac{M + \frac{\beta+3}{6(\beta+1)}}{C} + A \left[\frac{N + \frac{\beta+1}{6(\beta+1)}}{C} \right] - \frac{1}{3} \right] \right]^{-0.5},$$

where $A = \frac{\frac{M}{C} + \alpha(\beta-1)\frac{M}{C} + \frac{\beta+2}{3(\beta+1)}}{\frac{N}{C} + \frac{2\beta+1}{3(\beta+1)}}$ is the ratio of velocities of the outer and the inner walls; C is the mass

of the HE, g; M is the mass of the shell, g; N is the mass of the support, g; $k = 0.33D$ is Henry constant characterizing the HE propelling capacity; $\beta = r_o/r_i$ is the ratio of the outer and the inner HE radii; and $\alpha = 1$ is the cylindrical implosion coefficient.

In the experiments, the movement of the inner surface was recorded using a high-speed video camera. The advantage of this method of recording the implosion of cylindrical shells is the absence of obstacles and perturbations on the way of the moving inner surface of the shell. The recorded data was processed by photographic software programs using the measurement method. Figure 2 shows an example of images obtained when shooting at a frame frequency of 460 000 fps.

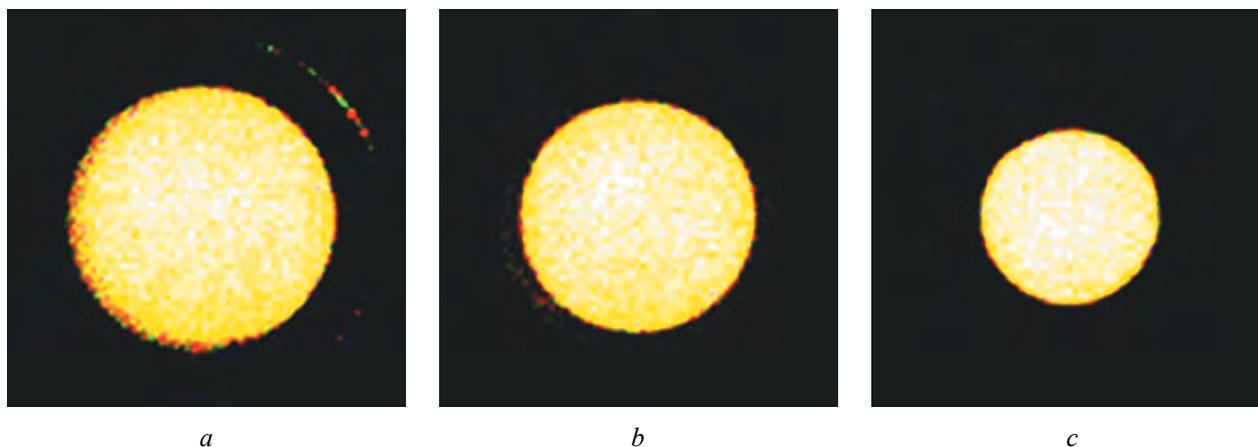


Fig. 2. Video frames showing the implosion of the copper shell in the experiment:

$a - t_0$; $b - t_0 + 10.9 \mu\text{s}$; $c - t_0 + 32.6 \mu\text{s}$

The report compares the calculated implosion velocities of the shells without an attenuator with the experimentally obtained implosion velocities of the shells with a sand attenuator. It is shown that the sand attenuator efficiently reduces the effect of shock wave loading on the shell and weakens the propelling capacity of HEs due to the dissipation of the shock wave energy during its propagation in the granular medium.

References

1. **Kobylkin, I. F.** Explosive technologies: Study guide [Text]. – M. : Publishing house of the Bauman MSTU, 2019.
2. **Grujicic, M.** Shock-Wave Attenuation and Energy-Dissipation Potential of Granular Materials [Text] / M. Grujicic, B. Pandurangan, W. C. Bell, S. Bagheri // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2012. – Vol. 21, No. 2. – P. 167–179.
3. **Hirsh, E.** Simplified and Extended Gurney Formulas for Imploding Cylinders and Spheres [Text] // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 1986. – Vol. 11, No. 1. – P. 6–9.

2-5

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТАТБ НА ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ТЕПЛОВЫМ И УДАРНО-ВОЛНОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

*И. А. Баталова, Т. В. Антипова, И. А. Ахлюстин, Ю. А. Беленовский, А. Ю. Гармашев,
А. В. Еганова, И. Э. Косолапов, К. М. Мирошкин, К. М. Просвирнин, И. В. Чемагина*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензол (ТАТБ) – мощное взрывчатое вещество, обладающее уникальным сочетанием высокой термической стабильности и низкой чувствительности к механическим и ударно-волновым воздействиям. В последнее время наблюдается довольно большой интерес к данному соединению, как компоненту малочувствительных смесевых ВВ повышенной стойкости к внешним воздействиям. Работы по поиску новых эффективных методов синтеза ТАТБ широко ведутся в США, Китае и других странах. В России существует две внедрённых в промышленное производство технологии получения ВВ ТАТБ.

В данном докладе представлены результаты исследования влияния технологии получения ВВ ТАТБ на его чувствительность к тепловым и ударно-волновым воздействиям.

В результате проведенных исследований не обнаружено существенных влияний технологии получения ВВ ТАТБ на его чувствительность к тепловым и ударно-волновым воздействиям.

INFLUENCE OF TATB FABRICATION TECHNOLOGY ON ITS SENSITIVITY TO THERMAL AND SHOCK IMPACTS

*I. A. Batalova, T. V. Antipova, I. A. Akhlyustin, Yu. A. Belenovskii, A. Yu. Garmashev,
A. V. Eganova, I. E. Kosolapov, K. M. Miroshkin, K. M. Prosvirnin, I. V. Chemagina*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene (TATB) is a high-power explosive matter possessing unique combination of high thermal stability and low sensitivity to mechanical and shock impacts. Recently, this composition has been under a focus of broad interest as a component of insensitive explosive mixtures, highly resistant to external impacts. The U.S., China, and other countries are extensively involved in searching for new efficient methods of TATB synthesis. In Russia, there are two TATB fabrication technologies implemented into industrial production.

The work gives the results of the study covering the influence of TATB fabrication technologies on its sensitivity to thermal and shock impacts.

The study performed has shown no significant influence of TATB fabrication technologies on TATB sensitivity to thermal and shock impacts.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ОКТОГЕНА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ И СРЕДЕ ГЕЛИЯ

К. Н. Беркутова, А. В. Сарафанников, А. Ю. Гармашев, Н. П. Тайбинов, О. В. Хрулева, И. А. Баталова, Т. В. Антипова, Ю. А. Шахторин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Изучение процессов горения индивидуальных и смесевых взрывчатых веществ представляет значительный практический интерес. Горение ВВ может возникать по разным причинам на предприятиях и складах при производстве и хранении ВВ, равно как и при их применении.

Исследуя газообразные продукты горения, их соотношение при разных условиях горения, можно судить об особенностях протекания химических реакций в указанных условиях для различных ВВ [1, 2].

В докладе приведены результаты экспериментальных исследований состава газообразных продуктов горения октогена в воздушной среде и в гелии. Представлены методика проведения экспериментов по горению ВВ, а также газохроматографическая и спектрофотометрическая методики анализа химического состава газообразных продуктов горения. Приведены химический состав и объемные концентрации газообразных продуктов, а также, составленные по экспериментальным данным оценочные уравнения горения октогена.

Метод исследования заключается в отборе и анализе газообразных продуктов, образующихся при горении навески октогена массой ~60 г во взрывобезопасном контейнере. Методика проведения экспериментов включает в себя подготовку контейнера к работе, установку и поджиг исследуемого образца, отбор проб и проведение анализа методами газовой хроматографии и спектрофотометрии.

Контейнер для проведения эксперимента снабжен системой измерения давления газов и системой газоотбора из верхней и донной частей.

Анализ газовых проб на содержание компонентов: водорода, азота, кислорода, оксида и диоксида углерода, закиси азота, метана, легких углеводородов, низших спиртов (H_2 , O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2O , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_3OH , C_2H_5OH , $HCOOH$, C_3H_8 , C_4H_{10} , CH_3COOCH_3) проводился на газовом хроматографе. Для примера на рис. 1 представлены хроматограммы, полученные при анализе O_2 , N_2 , CO .

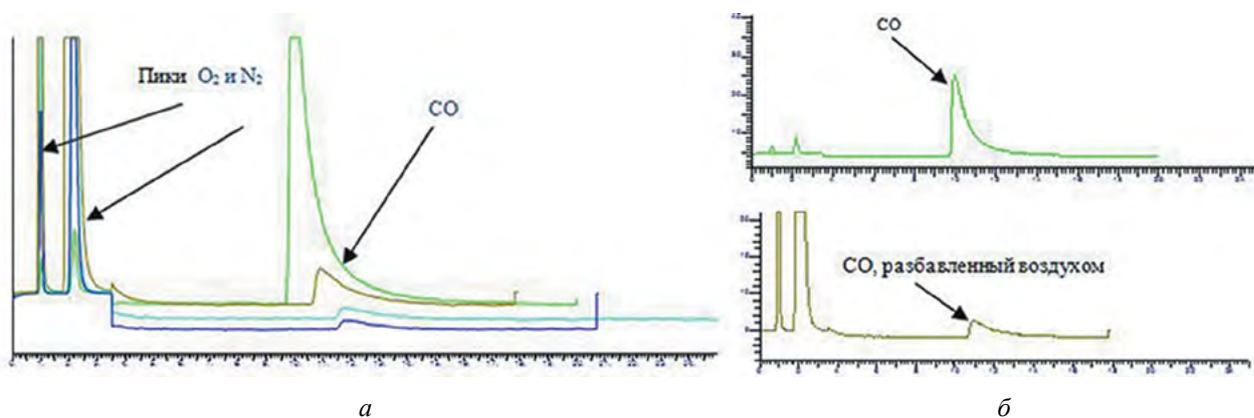


Рис. 1. Хроматограммы анализа продуктов горения октогена (а) и стандартных газовых смесей CO (исходная и разбавленная воздухом) (б)

Анализ газовых проб на содержание оксидов азота, аммиака, формальдегида, (NH_3 , CH_2O , NO , NO_2) проводили на фотоколориметре и спектрофотометре.

В ходе работы получены расчетные и экспериментальные данные по компонентам (продуктам горения), средние значения концентраций газообразных продуктов (в %, объем.) горения октогена определенные по хроматограммам и результатам фотометрического анализа, представлены значения

суммарного содержания газообразного азота после опыта, остаточного кислорода воздуха и рассчитанные значения содержания газообразного азота, образовавшегося при горении ВВ в сравнении с предельно допустимыми концентрациями этих веществ в воздухе [3].

Результаты, полученные при исследовании продуктов горения октогена в воздухе и в гелии по представленной методике дают основания для следующих выводов:

- Основными газообразными продуктами, образующимися при горении октогена в воздухе, являются диоксид углерода (CO_2), вода (H_2O), азот (N_2), а при горении в среде гелия – диоксид углерода (CO_2), оксид углерода (II) (CO), вода (H_2O), азот (N_2) и оксид азота (NO_2).

- В составе газообразных продуктов горения октогена зарегистрированы токсичные газы: оксид углерода (II) (CO), оксиды азота (NO , NO_2), концентрация каждого из зарегистрированных токсичных газообразных компонентов в продуктах горения октогена в воздухе выше ПДК, предусмотренных [3]. Концентрация токсичного угарного газа (CO) в продуктах горения октогена в опытах с гелием превышает ПДК ~ в $5 \cdot 10^3$ раз, а двуокиси азота NO_2 ~ в $4 \cdot 10^3$ раз [3].

Литература

1. Андреев, К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ [Текст]. – М. : Наука, 1966.
2. Манелис, Г. Б. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов [Текст] / Г. Б. Манелис, Г. М. Назин, Ю. И. Рубцов, В. А. Струнин. – М. : Наука, 1996.
3. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы [Текст] : ГН 2.2.5.686-98. – М. : Минздрав России, 1998.

ANALYSIS OF COMPOSITION OF HMX COMBUSTION GAS PRODUCTS IN AIR AND HELIUM ENVIRONMENTS

*K. N. Berkutova, A. V. Sarafannikov, A. Yu. Garmashev, N. P. Taibinov, O. V. Khruleva,
I. A. Batalova, T. V. Antipova, Yu. A. Shakhtorin*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

Studying the combustion processes of individual and composite explosive mixtures is of great practical interest. HE combustion can arise for various reasons at enterprises and warehouses during HE production, storage, and application.

The analysis of combustion gas products and their ratio under different combustion conditions allows one to estimate chemical reaction features under specified conditions for various HEs [1, 2].

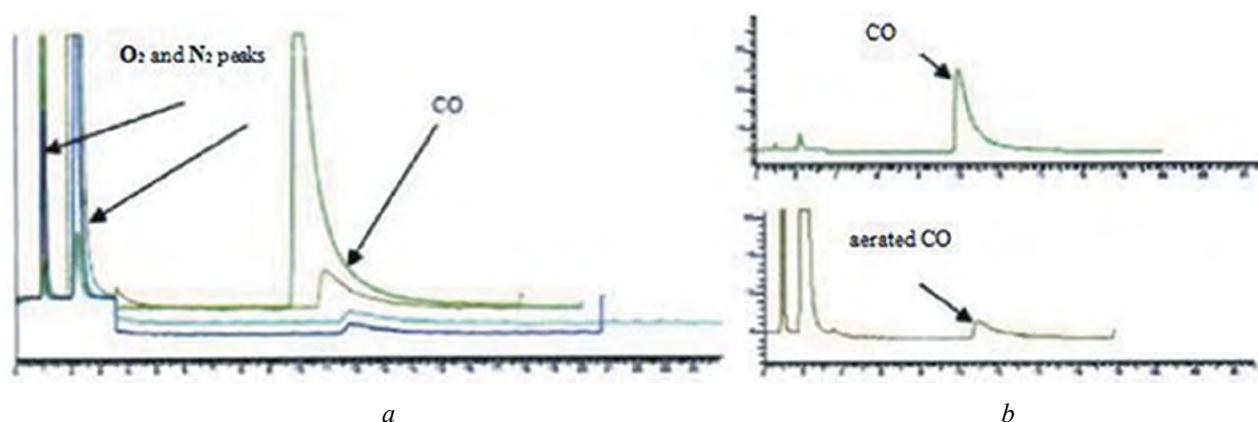


Fig. 1. Chromatograms of HMX combustion products (a) and standard CO gas mixtures (initial and aerated gas mixtures) (b)

The paper presents the results of experimental analysis of HMX combustion gas products in air and helium environments and describes the HE combustion experiment technique as well as gas chromatographic

and spectrophotometric methods used to analyze the chemical composition of gas combustion products. It also gives the chemical compositions and volume concentrations of gas products and provides HMX combustion estimation equations derived from experimental data.

The calculated and experimental data on components (combustion products), mean concentrations of HMX combustion gas products (vol %) determined from chromatographs and photometric analysis results are obtained. The total contents of gas nitrogen after the experiment and residual ambient oxygen, as well as the calculated content of gas nitrogen formed during HE combustion are presented in comparison with maximum permissible concentration (MPC) of these substances in air [3].

The results obtained in analyzing HMX combustion gas products in air and helium using the presented technique give grounds for the following conclusions:

- the basic gas products being formed during HMX combustion in air are carbon dioxide (CO₂), water (H₂O), and nitrogen (N₂), and the basic gas products being formed during combustion in helium environment are carbon dioxide (CO₂), carbon oxide (II) (CO), water (H₂O), nitrogen (N₂), and nitrogen oxide (NO₂);
- toxic gases were detected in HMX combustion gas products composition, i.e. carbon oxide (II) (CO) and nitrogen oxides (NO, NO₂), the concentration of each detected toxic gas components in HMX combustion gas products in air being higher than MPCs set forth in [3]. In the experiments with helium the concentration of toxic carbon oxide (CO) in HMX combustion gas products is $\sim 5 \cdot 10^3$ times higher than MPC, and that of nitrogen dioxide NO₂ is $\sim 4 \cdot 10^3$ times higher than MPC [3].

References

1. **Andreev, K. K.** Thermal decomposition and combustion of explosives [Text]. – М. : Nauka, 1966 (in Russian).
2. **Manelis, G. B.** Thermal decomposition and combustion of explosives and propellants [Text] / G. B. Manelis, G. M. Nazin, Yu. I. Rubtsov, V. A. Strunin. – М. : Nauka, 1996 (in Russian).
3. Maximum permissible concentrations (MPC) of hazardous substances in working zone air: Hygienic regulations [Text] : HR 2.2.5.686-98. – М. : Minzdrav Rossii, 1998 (in Russian).

2-7

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЛАСТИЗОЛЬНОГО МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ С УЛУЧШЕННОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

*Д. М. Гагаркин, Д. П. Дудник, А. В. Сарафанников, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Гармашев,
К. М. Просвирнин, К. М. Мирошкин, А. И. Ахметзянов, И. А. Баталова,
К. В. Еганов, А. С. Гремитских*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

На предприятии ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ» было разработано литьевое пластизольное малочувствительное ВВ (МЧВВ) с использованием в качестве наполнителя ВВ ТАТБ. Полученное МЧВВ, обладая показателями фугасного действия на уровне применяемых в ОБЧ октоген- и гексогенсодержащих пластизольных ВВ, значительно превосходит их по стойкости к внешним воздействиям. Данное ВВ предназначено для применения в крупногабаритных фугасных боеприпасах повышенной стойкости к внешним воздействиям. С целью уменьшения критического диаметра детонации, обеспечения иницируемости на заданном уровне, но сохранении при этом высоких показателей безопасности, была проведена работа по модернизации данного ВВ.

В работе представлены результаты исследований свойств модернизированного МЧВВ. Даны рекомендации по дальнейшей модернизации рецептуры литьевых ВВ с целью повышения их химической и физической стойкости, улучшения эксплуатационных свойств.

STUDYING THE PROPERTIES OF INSENSITIVE PLASTISOL HE WITH ENHANCED DETONABILITY

D. M. Gagarkin, D. P. Dudnik, A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov, A. Yu. Garmashev, K. M. Prosvirnin, K. M. Miroshkin, A. I. Akhmetzyanov, I. A. Batalova, K. V. Eganov, A. S. Gremitskih

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

The insensitive cast plastisol high explosive (HE) with TATB as a filling material was developed at FSUE “RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin”. While having nearly the same blast effect as the plastisol HMX- and RDX-based HEs that are used in conventional warheads, this insensitive plastisol HE is considerably superior to the above explosives in its resistance to the external influences. In order to reduce critical detonation diameter and ensure certain level of its ability to be initiated without loss of its high safety characteristics, this HE was upgraded.

The paper presents the results of studying the properties of the upgraded insensitive plastisol HE and gives recommendations on further upgrade of cast HEs formulation in order to improve their chemical and physical resistance and enhance their performance.

2-8

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ВЗРЫВЧАТЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВВ НТО

Д. М. Гагаркин, Д. П. Дудник, С. В. Шахмаев, А. В. Сарафанников, Е. Б. Смирнов, К. В. Ковалева, К. М. Просвирнин, Ю. А. Шахторин, И. В. Чемагина, И. А. Макарчев, Л. Н. Шинкарёва

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Как компонент взрывчатых композиций, обладающих пониженной чувствительностью к внешним воздействующим факторам, может рассматриваться ВВ 3-нитро-1,2,4-триазолон-5-он (нитротриазолон или НТО). Данное индивидуальное ВВ позиционируется в работах [1, 2] как малочувствительное ВВ.

В представленной работе приводятся результаты экспериментальных исследований физико-химических и взрывчатых характеристик индивидуального ВВ НТО, такие как чувствительность к механическим воздействиям, термостойкость, скорость детонации и др. Полученные характеристики ВВ НТО сравниваются с характеристиками наиболее широко применяемыми индивидуальных ВВ – ТАТБ, тротил, гексоген и октоген.

Литература

1. **Козырев, Н. В.** Расчетно-теоретические исследования смесевых малочувствительных композиций [Текст] / Н. В. Козырев, А. Г. Вакутин, М. В. Казутин // Южно-сибирский научный вестник. – 2020. – Вып. 6 (34). – С. 170.
2. **Lee, K. Y.** 3-Nitro-1,2,4-triazole-5-one, a less sensitive explosive [Text] / K. Y. Lee, M. D. Coburn // Los Alamos National Laboratory Report LA – 10302 MS. – Los Alamos : NM, 1985.

STUDY OF PHYSICAL, CHEMICAL, AND EXPLOSIVE PROPERTIES OF NTO

*D. M. Gagarkin, D. P. Dudnik, S. V. Shakhmaev, A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov, K. V. Kovaleva,
K. M. Prosvirnin, Yu. A. Shakhtorin, I. V. Chemagina, I. A. Makarchev, L. N. Shinkareva*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

3-Nitro-1,2,4-triazole-5-one (nitrotriazolone/NTO) can be considered as a component of explosive compositions characterized by reduced sensitivity to external influences. This individual high explosive (HE) has been regarded as an insensitive high explosive (IHE) in [1, 2].

The work presents the results of experiments conducted to study physical, chemical, and explosive properties of NTO: sensitivity to mechanical impacts, thermal stability, detonation velocity, etc. The obtained properties of NTO are compared to the properties of the most widely used individual HEs such as TATB, TNT, RDX, and HMX.

References

1. **Kozyrev, N. V.** Computational and theoretical studies of insensitive compositions [Text] / N. V. Kozyrev, A. G. Vakutin, M. V. Kazutin // *Yuzhno-Sibirsky Nauchny Vestnik*. – 2020. – Iss. 6 (34). – P. 170.
2. **Lee, K. Y.** 3-Nitro-1,2,4-triazole-5-one, a less sensitive explosive [Text] / K. Y. Lee, M. D. Coburn // Los Alamos National Laboratory Report LA – 10302 MS. – Los Alamos : NM, 1985.

2-9

ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ НИЗКОПЛОТНЫХ СМЕСЕЙ ТЭНА С НАНОДИСПЕРСНЫМ АЛЮМИНИЕМ ИМПУЛЬСАМИ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

*А. Г. Глуценко, М. С. Суров, А. Р. Бакиров, В. И. Сдобнов, А. В. Станкевич, А. Ю. Гармашев,
Д. В. Фролов, Д. А. Грибанов, С. М. Долгих, Д. В. Петров*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Основной проблемой при осуществлении прямого лазерного инициирования детонации индивидуальных ВВ является их высокая прозрачность в области большинства широко распространенных лазерных источников. В связи с этим нетривиальной задачей является сенсбилизация ВВ к лазерному излучению при сохранении чувствительности (а, в идеальном варианте, флегматизации) к прочим инициирующим детонацию воздействиям.

Одним из способов повышения чувствительности ВВ к импульсу лазерного излучения является введение в объем ВВ светопоглощающих добавок. В связи с этим актуальной задачей является оптимизация параметров смесового светочувствительного ВВ для минимизации порога его лазерного задействия.

В настоящей работе проведены исследования чувствительности низкоплотных ($\rho \leq 1,1$ г/см³) смесей тэна с нанодисперсным алюминием к импульсному лазерному излучению ($\lambda = 1064$ нм) наносекундной длительности. Представлено сравнение смесей, гомогенизированных ультразвуковым воздействием в среде легколетучей жидкости (гексане) и изготовленных сухим смешением в замкнутой электростатической системе. Показана эквивалентность этих технологий изготовления по отношению к чувствительности смеси к импульсному лазерному воздействию. Определены параметры смеси (плотность, количество и размер частиц алюминия), при которых порог лазерного импульсного задействия в ближнем инфракрасном диапазоне минимален.

INITIATION OF LOW-DENSITY MIXTURES OF PETN AND NANODISPERSED ALUMINUM BY NANOSECOND LASER PULSES

*A. G. Gluschenko, M. S. Surov, A. R. Bakirov, V. I. Sdobnov, A. V. Stankevich, A. Yu. Garmashev,
D. V. Frolov, D. A. Gribanov, S. M. Dolgikh, D. V. Petrov*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

The main issue arising on direct laser initiation of individual HEs detonation is their high transparency in the range of the most commonly used laser sources. Thus, a nontrivial problem is sensibilization of the HEs to laser radiation when keeping their sensitivity (ideally, flegmatization) to other detonation-inducing impacts.

Introduction of light-absorbing additives into an HE bulk is a way to increase the HE sensitivity to laser pulse. Therefore, a problem of immediate interest is to optimize the parameters of a light-sensitive HE mixture to minimize its laser initiation threshold.

The present work investigates sensitivity of low-density ($\rho \leq 1.1 \text{ g/cm}^3$) mixtures of PETN and nano-dispersed aluminum to nanosecond pulsed laser radiation ($\lambda = 1064 \text{ nm}$). It compares the mixtures homogenized under ultrasound impact in highly volatile liquid medium (hexane) and manufactured through dry mixing in a closed electrostatic system. The equivalence of these technologies in terms of mixture sensitivity to pulsed laser radiation is shown. The mixture parameters (density, quantity and size of aluminum particles) are determined at which the laser pulsed initiation threshold in near IR-range is minimal.

2-10

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОВОЛНОВОГО МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ БРИЗАНТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

*Г. А. Гребёнкин, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин, И. Г. Галиуллин,
И. А. Ахлюстин, К. В. Еганов, К. М. Мирошкин, А. С. Гремитских*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

В газодинамической практике РФЯЦ – ВНИИТФ проведение экспериментов по метанию пластин взрывчатыми веществами (ВВ) является очень распространенным и значимым для оценки и контроля качества параметров серийно изготавливаемых ВВ. Данные, полученные в экспериментах, также необходимы для численного моделирования детонации.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование процесса метания стальной пластины продуктами взрыва ВВ с использованием радиоволнового метода регистрации в условиях методики М-60.

Экспериментально процесс метания пластины исследуется в условиях методики М-60 с использованием электроконтактных датчиков, традиционно применяемой для оценки метательного действия ВВ.

Использование системы электроконтактных датчиков имеет ряд недостатков: невозможность непрерывного и невозмущающегося наблюдения разгона пластины во всем диапазоне измерений, а также трудоемкость в изготовлении.

Регистрация процесса движения пластины с применением радиоволновой методики позволяет избавиться от вышеперечисленных недостатков. В настоящей работе для регистрации движения пластины был использован радиоинтерферометр с длиной волны зондирующего излучения 3 мм.

Данные радиоволнового метода существенно более информативны, так как ведется процесс непрерывного наблюдения разгона пластины во всем диапазоне измерений, в отличие от электроконтактной методики, которая имеет дискретный метод записи полета пластины и влияние самих датчиков на полет пластины.

По результатам проведенных экспериментов рассчитывалась величина относительной метательной способности, которая как с применением электроконтактного, так и радиоволнового методов регистрации находится на одном уровне.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения радиоволнового метода регистрации для исследования метательной способности ВВ.

THE RADIO-WAVE RECORDING METHOD TO ESTIMATE RELATIVE DRIVING CAPABILITY OF HIGH EXPLOSIVES

G. A. Grebyonkin, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, K. M. Prosvirnin, I. G. Galiullin, I. A. Akhlyustin, K. V. Eganov, K. M. Miroshkin, A. S. Gremitskikh

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

Explosive-driven flyer-plate experiments are widely used in RFNC – VNIITF gas dynamics research to assess and control the quality of full-scaled produced explosives parameters. Also, the resulted data are needed for numerical simulation of detonation.

The given paper is focused on the experimental investigation of the steel plate acceleration by explosive products using the radio-wave recording method within M-60 technique.

According to M-60 technique, the plate throwing process is experimentally investigated using electric contact sensors, which are conventionally used for the explosive driving assessment.

The use of electric contact sensors array has several disadvantages: they do not allow continuous and non-perturbative sensing of the plate acceleration within the whole measurement range; moreover, their manufacturing is labour-intensive.

Radio-wave method of recording the plate motion helps to avoid the mentioned disadvantages. In the given experiment, the radio interferometer with the probing radiation wavelength of 3 mm was used to record the plate motion.

Compared to the electrical contact technique, which implies discrete plate flight recording and the sensors affecting the plate flight, the radio-wave method provides with much more informative data due to the continuous recording of the plate acceleration within the whole measurement range.

The relative driving capability calculated based on the experimental results is shown to be the nearly the same for both electric contact and radio-wave recording methods.

The obtained results allow concluding that the radio-wave recording method may be used to investigate the explosive driving capability.

2-11

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ОКТОГЕНА В ГЕРМЕТИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, О. Н. Козлова, А. С. Емельянов

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва, Россия

В статье рассматриваются экспериментальные данные по разложению октогена, полученные при плотностях заполнения реакционной ячейки, близких к максимально возможным ($m/v = \rho$, где m –

масса образца, v – внутренний объем реакционной ячейки, ρ – плотность вещества) и при больших внешних давлениях окружающей среды.

При давлениях до 0,07–0,2 GPa происходит увеличение скорости разложения, при давлениях выше 0,1–0,2 GPa происходит замедление скорости распада октогена, повышение давления от 10^{-4} GPa до $7 \cdot 10^{-3}$ GPa приводит к уменьшению энергии активации от 55,9 ккал/моль до 41,8 ккал/моль с одновременным увеличением скорости разложения. Увеличение давления до 5,5 GPa приводит к увеличению энергии активации до 120 ккал/моль, при дальнейшем увеличении давления энергия активации падает до 37,5 ккал/моль с тенденцией падения до нулевого значения. При давлении до 5,5 GPa происходит рост свободной энергии Гипса, свыше 5,5 GPa начинается падение. При давлении свыше 6,5–7 GPa это может привести к самопроизвольному разложению октогена.

Для описания экспериментальных данных по разложению октогена при давлениях до 1,1 GPa достаточно модели первого порядка с учетом растворения исходного вещества в продуктах реакции, при больших давлениях (3,6 GPa) достаточно простых моделей автокатализа первого порядка. При повышении давления до 3,6 GPa наблюдается слабое ускорение разложения во времени, при давлении 4,6 GPa разложение происходит по нулевому порядку.

Проведено сравнение возможностей описания экспериментальных данных с использованием расширенной кинетической модели Проута–Томпкинса и формально-кинетического подхода с учетом физико-химических превращений в октогене.

FEATURES OF HMX DECOMPOSITION UNDER CONSTANT VOLUME CONDITIONS

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, O. N. Kozlova, A. S. Emelyanov

Central research institute of chemistry and mechanics, Moscow, Russia

This article discusses experimental data on the HMX decomposition obtained at the filling densities of the reaction cell close to the maximum possible value ($m/v = \rho$, where m is the mass of the sample, v is the internal volume of the reaction cell, ρ is the density of the substance) and at high external environmental pressures.

The decomposition rate increases as the pressure is up to 0.07–0.2 GPa, as the pressure is above

0.1–0.2 GPa the HMX slows down, as the pressure increases from 10^{-4} GPa to $7 \cdot 10^{-3}$ GPa the activation energy decreases from 55.9 kcal/mol to 41.8 kcal/mol with a simultaneous increase in the decomposition rate. As the pressure increases to 5.5 GPa the activation energy increases to 120 kcal/mol, if the pressure increases further, the activation energy drops to 37.5 kcal/mol with a tendency drops to zero value. At a pressure of up to 5.5 GPa, the free Gibbs energy increases, over 5.5 GPa begins to fall. At pressure above 6.5–7 GPa, spontaneous decomposition of the HMX can appear.

To describe experimental data on HMX decomposition at pressure up to 1.1 GPa a first-order model is sufficient, taking into account the dissolution of the starting substance in the reaction products, at higher pressure (3.6 GPa) simple first-order autocatalysis models are sufficient. When the pressure increases to 3.6 GPa, there is a slight acceleration of decomposition; at a pressure of 4.6 GPa, decomposition follows the zero-order model.

The possibilities of describing experimental data using the extended kinetic Prout-Tompkins model and the formal kinetic approach with physicochemical transformations in the HMX are compared.

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ОКТОГЕНЕ

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, С. А. Атясов, А. С. Емельянов

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва, Россия

Исследование кинетики разложения в кристаллическом состоянии октогена осложняется тем, что у него имеется 5 модификаций. Наибольшее практическое значение имеет β -форма октогена, поэтому важно, для какой полиморфной модификации проводится исследование кинетики разложения октогена. Основные кинетические данные относятся к γ -модификации.

Процесс фазового перехода исследовался в статических и динамических условиях нагрева, на моно- и поликристаллических образцах, на образцах прессованных и содержащих полимерную связку. Для обработки экспериментальных данных, полученных разными авторами, использовались модели от уравнения первого порядка до автокатализа первого порядка с учетом обратимости реакций, феноменологические модели в виде уравнений Проута–Томпкинса и Авраами–Ерофеева, модифицированное уравнение Проута–Томпкинса, уравнение Киссинджера, метод Озава, изокинетический метод.

Анализ литературных данных и проведенные расчеты показывают, что особенности процесса фазового перехода обусловлены многими факторами, в рамках одной серии экспериментов могут меняться закономерности процесса.

Использование формально-кинетического подхода позволяло авторам выбрать минимально сложные модели, позволяющие описывать экспериментальные данные процесса фазового перехода. Процесс подчиняется простым моделям – автокатализу первого порядка, для ряда экспериментов требуется модель двух последовательных реакций. Наглядно показано, что в рамках одной серии опытом могут меняться закономерности протекания процесса фазового перехода.

HMX PHASE TRANSITIONS

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, S. A. Atyasov, A. S. Emelyanov

Central research institute of chemistry and mechanics, Moscow, Russia

The study of the HMX crystalline state decomposition kinetics is complicated because it has 5 polymorphic modifications. The β -form of HMX is of the greatest practical importance, therefore it is important HMX decomposition kinetics of which polymorphic modification is being studied. The literature sources of kinetic data mostly relate to the γ -modification.

The phase transition process was studied under static and dynamic heating conditions, on mono- and polycrystalline samples, on pressurized samples and the ones containing a polymer additive. The experimental data obtained by different authors was processed, a variety of kinetic models were used ranging from the first-order equation to first-order autocatalysis, taking into account the reversibility of reactions, phenomenological models in the form of the Prout–Tompkins and Avrami–Yerofeyev equations, the modified Prout–Tompkins equation, the Kissinger equation, the Ozawa method, the isokinetic method.

The literature data analysis and the following calculations show that the definitive properties of the phase transition depend on to many factors, within the scope of single raw of experiments, the regularities of the process can change.

The formal kinetic approach allowed the authors to choose less complex models that allow describing experimental data of the phase transition process. The process obeys simple models – first-order autocatalysis, for a number of experiments a model of two consequent reactions is required. It is shown that within the scope of single raw of experiments, the patterns of the phase transition process can change.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

А. Р. Касимов, А. Ю. Голдин

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

В данной работе исследуются динамические явления, возникающие при распространении газовой детонации в среде с периодически меняющимися в пространстве свойствами, такими как неоднородности температуры или концентрации топлива, или неоднородности, связанные со свойствами канала, в котором распространяется волна. В случае однородной среды детонация может распространяться в колебательном режиме с переменной во времени скоростью в одномерном случае или в форме ячеистой детонации в многомерном случае. Вопрос о влиянии неоднородности в исходной горючей смеси или в свойствах канала на такую динамику детонации представляет интерес, и он был изучен недавно как в рамках модельного уравнения Бюргерса [6, 8], так и на основе уравнений Эйлера [7, 5, 2, 3]. В этих работах установлено существование явления резонансного усиления колебаний скорости детонации и захвата частот или синхронизации. Обнаружено, что процесс захвата частот приводит к возникновению языков Арнольда [9, 2]. Показано, что рассчитанные для этого процесса числа вращений в зависимости от волнового числа периодичности в исходной смеси имеют вид дьявольской лестницы [4, 1]. В двумерном случае распространения детонации в неоднородной среде возникают некоторые новые явления, связанные с перестройкой ячеистой структуры детонации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-21-00902.

Литература

1. **Bak, P.** Devil's staircase [Text] // *Physics Today*. – 1986. – Vol. 39, No. 12. – P. 38–45.
2. **Goldin, A. Yu.** Synchronization of detonations: Arnold tongues and devil's staircase [Text] / A. Yu. Goldin and A. R. Kasimov // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2022. – Vol. 946:R1.
3. **Goldin, A. Yu.** Mode locking in gaseous detonation propagation in a channel with periodically varying friction [Text] / A. Yu. Goldin, T. O. Medvedeva, and A. R. Kasimov // *Physics of Fluids*. – 2022. – Vol. 34(096104). – P. 1–10. DOI: 10.1063/5.0103370. URL <https://doi.org/10.1063/5.0103370>.
4. **Jensen, M. H.** Complete devil's staircase, fractal dimension, and universality of mode-locking structure in the circle map [Text] / M. H. Jensen, P. Bak, and T. Bohr // *Physica Review Letters*. – 1983. – Vol. 50, No. 21. – P. 1637–1639.
5. **Kasimov, A. R.** Resonance and mode locking in gaseous detonation propagation in a periodically non-uniform medium [Text] / A. R. Kasimov and A. Yu. Goldin // *Shock Waves*. – 2021. – Vol. 31. – P. 841–849.
6. **Kasimov, A. R.** Analog modeling of detonation in a periodic medium [Text] / A. R. Kasimov and A. R. Gonchar // *Proceedings of 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. – 2019, number Paper 168.
7. **Kasimov, A. R.** Reactive Euler model for detonation propagation in a nonuniform medium [Text] / A. R. Kasimov and A. Yu. Goldin // *Detonation: Latest accomplishments*; editor S. M. Frolov. – M.: TORUS PRESS, 2021.
8. **Kasimov, A. R.** Reactive Burgers model for detonation propagation in a non-uniform medium [Text] / A. R. Kasimov and A. R. Gonchar // *Proceedings of the Combustion Institute*, page S1540748920306404, October 2020. ISSN 15407489. DOI: 10.1016/j.proci.2020.07.149. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1540748920306404>.
9. **Rosenblum, M.** Synchronization: From pendulum clocks to chaotic lasers and chemical oscillators [Text] / M. Rosenblum and A. Pikovsky // *Contemporary Physics*. – 2003. – Vol. 44, No. 5. – P. 401–416. DOI: 10.1080/00107510310001603129.

DYNAMIC PHENOMENA IN GAS DETONATION PROPAGATION IN NONUNIFORM MEDIA

A. R. Kasimov, A. Yu. Goldin

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

This work investigates the dynamic phenomena arising during the propagation of gaseous detonation in a medium with periodically varying properties in space, such as inhomogeneities of temperature or fuel concentration, or inhomogeneities related to the properties of the channel in which the wave propagates. In the case of a homogeneous medium, detonation can propagate in an oscillating mode with a time varying velocity in the one-dimensional case or in the form of a cellular detonation in the multidimensional case. The question of the influence of heterogeneity in the initial combustible mixture or in the channel properties on such detonation dynamics is of interest, and it has recently been studied both within the framework of the model Burgers equation [6, 8] and on the basis of the Euler equations [7, 5, 2, 3]. In these works, the existence of the phenomenon of resonant amplification of oscillations of the detonation velocity and mode locking or synchronization was established. It was found that the process of mode locking leads to the appearance of Arnold tongues [9, 2]. It is shown that the rotation numbers calculated for this process depending on the wave number of periodicity in the initial mixture have the form of a devil's staircase [4, 1]. In the two-dimensional case of detonation propagation in an inhomogeneous medium, some new phenomena related to the restructuring of the detonation cells arise.

The study was supported by the Russian Science Foundation within the scientific project No. 22-21-00902.

References

1. **Bak, P.** Devil's staircase [Text] // *Physics Today*. – 1986. – Vol. 39, No. 12. – P. 38–45.
2. **Goldin, A. Yu.** Synchronization of detonations: Arnold tongues and devil's staircase [Text] / A. Yu. Goldin and A. R. Kasimov // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2022. – Vol. 946:R1.
3. **Goldin, A. Yu.** Mode locking in gaseous detonation propagation in a channel with periodically varying friction [Text] / A. Yu. Goldin, T. O. Medvedeva, and A. R. Kasimov // *Physics of Fluids*. – 2022. – Vol. 34(096104). – P. 1–10. DOI: 10.1063/5.0103370. URL <https://doi.org/10.1063/5.0103370>.
4. **Jensen, M. H.** Complete devil's staircase, fractal dimension, and universality of mode-locking structure in the circle map [Text] / M. H. Jensen, P. Bak, and T. Bohr // *Physica Review Letters*. – 1983. – Vol. 50, No. 21. – P. 1637–1639.
5. **Kasimov, A. R.** Resonance and mode locking in gaseous detonation propagation in a periodically nonuniform medium [Text] / A. R. Kasimov and A. Yu. Goldin // *Shock Waves*. – 2021. – Vol. 31. – P. 841–849.
6. **Kasimov, A. R.** Analog modeling of detonation in a periodic medium [Text] / A. R. Kasimov and A. R. Gonchar // *Proceedings of 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. – 2019, number Paper 168.
7. **Kasimov, A. R.** Reactive Euler model for detonation propagation in a nonuniform medium [Text] / A. R. Kasimov and A. Yu. Goldin // *Detonation: Latest accomplishments*; editor S. M. Frolov. – M. : TORUS PRESS, 2021.
8. **Kasimov, A. R.** Reactive Burgers model for detonation propagation in a non-uniform medium [Text] / A. R. Kasimov and A. R. Gonchar // *Proceedings of the Combustion Institute*, page S1540748920306404, October 2020. ISSN 15407489. DOI: 10.1016/j.proci.2020.07.149. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1540748920306404>.
9. **Rosenblum, M.** Synchronization: From pendulum clocks to chaotic lasers and chemical oscillators [Text] / M. Rosenblum and A. Pikovsky // *Contemporary Physics*. – 2003. – Vol. 44, No. 5. – P. 401–416. DOI: 10.1080/00107510310001603129.

ДЕТОНАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ПАЛЛАДИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ В ЗАДАЧАХ КАТАЛИЗА

*А. О. Кашкаров¹, Е. Ю. Герасимов², Б. Л. Мороз², Д. А. Будушев², Ф. С. Голубь²,
Э. Р. Прууэл¹, Н. А. Хлебановский³*

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В работе приводятся результаты использования энергии взрыва для термического разложения содержащих палладий органических соединений с последующим образованием наночастиц палладия и его оксида и использования полученного продукта в качестве катализатора разложения муравьиной кислоты. Особенностью предлагаемого способа синтеза катализаторов является одностадийный процесс получения как активного компонента, так и его носителя.

Считается, что формирование частиц происходит из свободных атомов металлов и их оксидов, образованных в результате термического разложения прекурсоров за детонационным фронтом, по диффузионному механизму [1]. За счет высокой температуры и давления за фронтом детонации, продукты взрыва стремительно расширяются и время на реализацию диффузионного механизма, которое зависит от используемого взрывчатого состава и размеров заряда, ограничено единицами микросекунд. Это обстоятельство является кинематическим фактором ограничения роста частиц.

Сопутствующим процессом является формирование детонационного углерода, покрывающего поверхность образуемых частиц, что также препятствует их росту. В то же время детонационный углерод является носителем каталитически активных частиц металлов и их оксидов. Для содержащих палладий продуктов были подобраны режимы активации полученного материала, позволяющие частично удалить углеродную оболочку с поверхности частиц для обеспечения контакта с реагентами.

Использование различных органических соединений палладия позволило варьировать диапазон размеров каталитически активных частиц от кластерных форм до 20 нанометров, а также и их количество [2].

Применение полученных образцов в качестве катализатора реакции разложения муравьиной кислоты с образованием свободного водорода показало, что они обладают повышенной, по сравнению с модельными катализаторами сравнения, активностью и селективностью. Также отмечено влияние размеров активных частиц и их количества на характер каталитической активности.

Литература

1. **Толочко, Б. П.** Физико-химическая модель детонационного синтеза наночастиц из карбоксилатов металлов [Текст] / Б. П. Толочко, А. П. Чернышев, К. А. Тен и др. // Физика металлов и металловедение. – 2008. – Т. 105, № 2. – С. 145–151.
2. **Kashkarov, A. O.** Detonation synthesis of non-agglomerated metallic nanoparticles deposited on carbon supports [Text] / A. O. Kashkarov, E. R. Prueel, K. A. Ten et al. // JPCS. – 2019. – Vol. 1147, № 1. – P. 012037.

DETONATION SYNTHESIS OF PALLADIUM NANOPARTICLES AND THEIR APPLICATION IN TASKS OF CATALYSIS

*A. O. Kashkarov¹, E. Y. Gerasimov², B. L. Moroz², D. A. Bulushev², F. S. Golub²,
E. R. Prueel¹, N. A. Khlebanovskii³*

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Boreskov Institute of Catalysis, SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of using the explosion energy for the thermal decomposition of organic compounds containing palladium, followed by the formation of nanoparticles of palladium and its oxide, and the use of the resulting product as a catalyst for the decomposition of formic acid. A feature of the proposed method for the synthesis of catalysts is a one-stage process for obtaining both the active component and its support.

It is believed that the formation of particles occurs from free metal atoms and their oxides, formed as a result of the thermal decomposition of precursors behind the detonation front, according to the diffusion mechanism [1]. Due to the high temperature and pressure behind the detonation front, the products of the explosion rapidly expand. The time for the realization of the diffusion mechanism depends on the explosive composition and size of the charge. This time is limited to a few microseconds. This circumstance is a kinematic factor limiting the growth of particles.

An accompanying process is the formation of detonation carbon, which covers the surface of the formed particles, also preventing their growth. At the same time, detonation carbon is also a catalyst support for active particles of metals and their oxides. For materials containing palladium, activation modes have been found that make it possible to partially remove the carbon shell from the particle surface to ensure contact with the reagents.

The use of various organic compounds of palladium allows varying the size range of catalytically active particles from cluster forms to 20 nanometers, as well as their quantity [2].

The application of the obtained samples as a catalyst for the decomposition of formic acid with the formation of free hydrogen showed that they have increased activity and selectivity compared to the reference model catalysts. The influence of the sizes of active particles and their quantity on the nature of the catalytic activity was also noted.

References

1. **Tolochko, B.** Physicochemical model of detonation synthesis of nanoparticles from metal carboxylates [Text] / B. Tolochko, A. Chernyshev, K. Ten et al. // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2008. – Vol. 105, № 2. – P. 134–140.
2. **Kashkarov, A. O.** Detonation synthesis of non-agglomerated metallic nanoparticles deposited on carbon supports [Text] / A. O. Kashkarov, E. R. Prueel, K. A. Ten et al. // *JPCS*. – 2019. – Vol. 1147, № 1. – P. 012037.

2-15

ИЗУЧЕНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНОГО ВВ НА ОСНОВЕ БЕНЗОТРИФУРОКСАНА, ПОДВЕРНУТОГО ДЛИТЕЛЬНОМУ ХРАНЕНИЮ

*А. В. Клепинин, Д. М. Гагаркин, Д. П. Дудник, А. В. Сарафанников, Е. Б. Смирнов,
А. Ю. Гармашев, С. В. Шахмаев, К. М. Просвирнин, И. В. Чемагина*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Бензотрифуроксан – ВВ, обладающее хорошей термостойкостью и малым критическим диаметром детонации. Данные качества ВВ позволяют создавать композиции пластичных ВВ на его основе.

Исследуемое пластичное взрывчатое вещество (ПВВ) на основе бензотрифуроксана и инертной связки было разработано для расширения температурно-временного диапазона эксплуатации систем инициирования и детонационной логистики.

В настоящем докладе представлены результаты работ по изучению некоторых свойств ПВВ на основе бензотрифуроксана и инертной связки, подвергнутого длительному хранению.

Было показано, что длительное хранение (35 лет) ПВВ на основе бензотрифуроксана и инертной связки привело к ухудшению некоторых его свойств, но при этом ПВВ сохранило свою работоспособность.

INVESTIGATION OF SOME PROPERTIES OF LONG-STORED BENZOTRIFUROXANE-BASED PLASTIC HE

*A. V. Klepinin, D. M. Gagarkin, D. P. Dudnik, A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov, A. Yu. Garmashev,
S. V. Shakhmaev, K. M. Prosvirnin, I. V. Chemagina*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

Benzotrifuroxane represents an HE possessing good thermal stability and small critical detonation diameter. These HE characteristics allow using it to formulate plastic HE compositions.

The investigated plastic high explosive (plastic HE) based on benzotrifuroxane and an inert binder was designed to extend the temperature-time range of initiation and detonation logistic systems.

The paper presents the results of investigating some properties of long-stored plastic HEs based on benzotrifuroxane and the inert binder.

The long-term storage (35 years) of the plastic HE based on benzotrifuroxane and the inert binder is shown to result in degradation of some properties, but herewith the plastic HE has remained functional.

2-16

РАЗЛОЖЕНИЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

A. M. Климов, К. Н. Панов, М. Е. Шаврин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва, Саров, Россия

При математическом моделировании процессов инициирования взрывчатых веществ (ВВ) широкое использование получили формально-кинетические модели, в которых из физических соотношений задается функциональная связь между параметрами характеризующими процесс химического разложения ВВ, а экспериментальные данные используются для определения коэффициентов в соответствующих зависимостях [1–2]. При этом процесс разложения ВВ характеризуется одной переменной α , которая определяется как отношение массы прореагировавшего вещества к общей массе исходного ВВ.

В работах [3–4] описан расчетно-экспериментальный метод получения кинетических данных о процессе химического разложения. В работе [5] для извлечения кинетики разложения ВВ использовался метод квазитонких слоев (КТС).

Уменьшить погрешность определения α можно путем одновременного измерения зависимостей $V(t)$ и $P(t)$ непосредственно в эксперименте. В настоящее время в литературе появилось много работ, посвященных исследованию состояния вещества за фронтом УВ (ДВ) с помощью излучений

разного вида [6–8]. Эти работы посвящены, главным образом, проблеме определения плотности вещества за фронтом ДВ или ИУВ. В работе [9] предложен экспериментальный метод для определения закономерности разложения ВВ за фронтом УВ по зависимостям $P(t)$ и $V(t)$, полученных в одном опыте.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование поведения смесового взрывчатого состава (ВС) при ударно-волновом нагружении предложенным методом.

Схематический вид экспериментальной сборки представлен на рис.1.

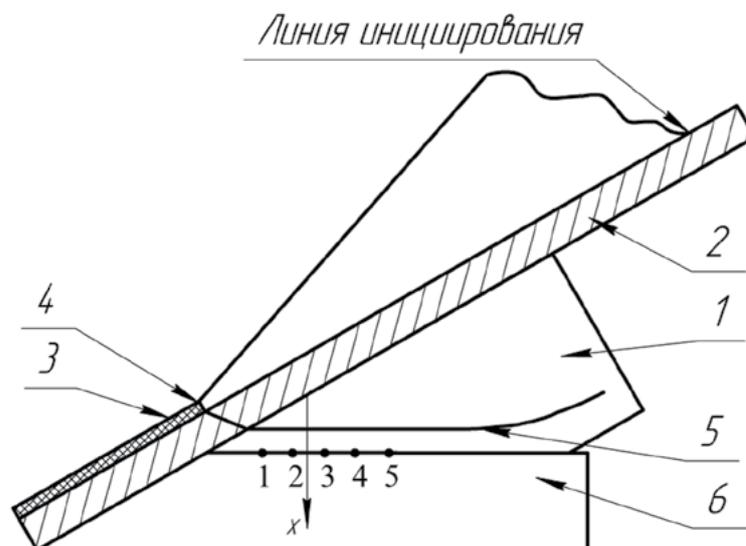


Рис. 1. Схематический вид экспериментальной сборки:

1 – образец; 2 – демпфер; 3 – слой ПВВ; 4 – фронт ДВ в ПВВ; 5 – фронт УВ в исследуемом образце; 6 – «оптический» клин

Литература

1. **Tarver, C. M.** Modeling Short Pulse Duration Shock Initiation of Solid Explosives [Text] / C. M. Tarver, J. O. Hallquist, L. M. Erickson // 8th Symp. (Int.) on Detonation. New Mexico. – 1985. – Vol. 3. – P. 884.
2. **Уткин, А. В.** Расчет неидеальной детонации тротила на основе эмпирического уравнения макрокинетики [Текст] / А. В. Уткин, Т. И. Фортова, Г. И. Канель и др. // Химическая физика. – 1988. – Т. 7, № 9. – С. 1257.
3. **Канель, Г. И.** Разложение литого тротила в ударных волнах [Текст] / Г. И. Канель, А. Н. Дремин // ФГВ. – 1977. – № 1. – С. 85.
4. **Nutt, G. L.** Reactive Flow Lagrange in RX-26-AF / Gerald L. Nutt, LeRoy M. Erickson. // Shock Waves in Condensed Matter. – LLNL : California, 1983.
5. **Андреев, С. Г.** Основы метода квазитонких слоев для извлечения кинетики разложения ВВ при динамических нагрузках [Текст] / С. Г. Андреев, В. В. Зюзин, Н. А. Имховик, В. С. Соловьев // Химическая физика. – 1990. – Т. 9. – С. 945.
6. **Зубков, П. И.** Измерение плотности вещества за фронтом ударных и детонационных волн с помощью синхротронного излучения [Текст] / П. И. Зубков, Г. Н. Кулипанов, Л. А. Лукьянчиков, Н. З. Ляхов, К. А. Тэн, В. М. Титов и др. // Международная конференция III Харитоновские тематические научные чтения. – Саров : РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2001. – С. 306–311.
7. **Zumbro, J. D.** Proton Radiography of the Detonation Front in HE Systems [Text] / J. D. Zumbro, K. J. Adams, K. R. Alrick et al. // 11th Symp. (Intern.) on Detonation. Colorado. – 1998. – P. 54.
8. **Панов, К. Н.** Исследование рентгенографическим методом эволюции профиля плотности вещества за фронтом расходящейся ударной волны во взрывчатом веществе [Текст] / К. Н. Панов, В. А. Комрачков // ФГВ. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 102–108.
9. **Панов, К. Н., Комрачков В. А.** // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 102.

DECOMPOSITION OF PLASTICIZED OCTOGEN BEHIND THE SHOCK WAVE FRONT

A. M. Klimov, K. N. Panov, M. E. Shavrin

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics”,
Institute of Experimental Gas Dynamics and Explosion Physics, Sarov, Russia

Formal kinetic models have been widely used in mathematical modeling of the initiation of explosives, in which, for physical reasons, a functional relationship is set between the parameters characterizing the process of chemical decomposition of explosives, and experimental data are used to determine the coefficients in the corresponding dependencies [1–2]. In this case, the process of decomposition of explosives is characterized by one variable α , which is defined as the ratio of the mass of the reacted substance to the total mass of the initial explosives.

In [3–4], a computational and experimental method for obtaining kinetic data on the process of chemical decomposition is described. In [5], the method of quasi-thin layers was used to extract the kinetics of explosive decomposition.

It is possible to reduce the error in determining α by simultaneously measuring the dependencies $V(t)$ and $P(t)$ directly in the experiment. Currently, many works have appeared in the literature devoted to the study of the state of matter behind the shock wave (detonation front) front using different types of radiation [6–8]. These works are mainly devoted to the problem of determining the density of matter behind the front of the detonation front or initiating shock wave. In [9], an experimental method was proposed to determine the regularity of the decomposition of explosives behind the SW front by the dependencies $P(t)$ and $V(t)$ obtained in one experiment.

The purpose of this work is an experimental study of the behavior of a mixed explosive composition under shock-wave loading by the proposed method.

A schematic view of the experimental assembly is shown in fig.1.

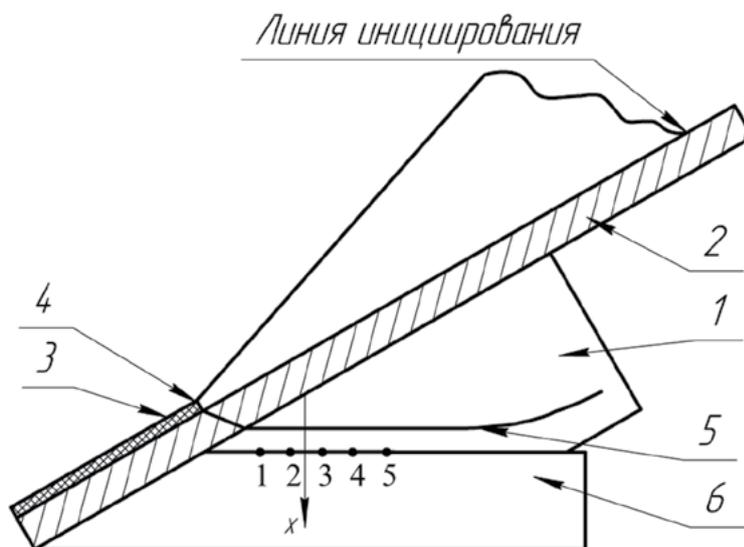


Fig. 1. Schematic view of the experimental assembly:

1 – sample; 2 – damper; 3 – PVV layer; 4 – DV front in PVV; 5 – SW front in the test sample; 6 – “Optical” wedge

References

1. **Tarver, C. M.** Modeling Short Pulse Duration Shock Initiation of Solid Explosives [Text] / C. M. Tarver, J. O. Hallquist, L. M. Erickson // 8th Symp. (Int.) on Detonation. New Mexico. – 1985. – Vol. 3. – P. 884.
2. **Utkin, A. V.** Calculation of non-ideal detonation of TNT based on the empirical equation of macrokinetics [Text] / A. V. Utkin, T. I. Fortova, G. I. Kanel et al. // Chemical Physics. – 1988. – Vol. 7, No. 9. – P. 1257.

3. **Kanel, G. I.** Decomposition of cast TNT in shock waves [Text] / G. I. Kanel, A. N. Dremin // FGV. – 1977. – No. 1. – P. 85.
4. **Nutt, G. L.** Reactive Flow Lagrange in RX-26-AF [Text] / Gerald L. Nutt, LeRoy M. Erickson // Shock Waves in Condensed Matter. – LLNL : California, 1983.
5. **Andreev, S. G.** Fundamentals of the quasi-thin layers method for extracting the kinetics of explosive decomposition under dynamic loads [Text] / S. G. Andreev, V. V. Zyuzin, N. A. Imkhovik, V. S. Soloviev // Chemical Physics. – 1990. – Vol. 9. – P. 945.
6. **Zubkov, P. I.** Measurement of the density of matter behind the front of shock and detonation waves using synchrotron radiation [Text] / P. I. Zubkov, G. N. Kulipanov, L. A. Lukyanchikov, N. Z. Lyakhov, K. A. Ten, V. M. Titov et al. // International Conference “III Khariton’s thematic scientific readings”. – Sarov : VNIIEF, 2001. – P. 306–311.
7. **Zambro, J. D.** Proton Radiography of the Detonation Front in HE Systems [Text] / J. D. Zambro, K. J. Adams, K. R. Alrick et al. // 11th Symp. (Intern.) on Detonation. Colorado. – 1998. – P. 54.
8. **Panov, K. N.** Investigation by the X-ray method of the evolution of the density profile of matter behind the front of a divergent shock wave in an explosive substance [Text] / K. N. Panov, V. A. Komrachkov // FGV. – 2004. – Vol. 40, No. 5. – P. 102–108.
9. **Panov, K. N., Komrachkov V. A.** // Physics of burning and explosion. – 2004. – Vol. 40, No. 5. – P. 102.

2-17

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВОРОТА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ОБРАЗЦАХ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

*А. Э. Клищенко, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин, И. Г. Галиуллин,
К. М. Мирошкин, М. М. Банников*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Процесс возникновения и развития детонации в низкочувствительных взрывчатых веществах (ВВ) зависит от различных факторов: плотности, дисперсности, ударно-волновой чувствительности, давления инициирования и др. При этом, в определенных условиях существует вероятность распространения детонации только в осевом направлении, когда периферийная область остается непрореагировавшей, проявляется своего рода «канальное» распространение детонационной волны (ДВ).

Для изучения данного нестационарного ударно-волнового процесса были проведены опыты на образцах низкочувствительного ВВ на основе ТАТБ диаметром 60 мм и высотой 50 мм. В качестве инициатора использовались образцы ВВ на основе октогена диаметром 20 мм и высотой 30 мм (общая высота инициатора составляла 60 мм). Инициирование исследуемых образцов осуществлялось по оси образца ВВ ($R = 0$ мм) и со смещением от оси на величину $R/2$ (15 мм).

Фотохронографическим методом проводилась регистрация профилей выхода ДВ на боковую и торцевую поверхности, а в качестве параметра, характеризующего процесс разворота ДВ, был выбран угол θ – угол между осью образца и направлением до места максимального разворота ДВ при выходе на поверхность образца (торцевую и/или боковую).

В данной постановке опытов получены значения угла разворота ДВ θ . При инициировании по оси образца ВВ наблюдалось только осевое («канальное») распространение ДВ. В случае со смещением инициирования на величину $R/2$ происходил частичный выход ДВ как на торцевую, так и боковую поверхности. Периферийная область образца ВВ, удаленная от оси инициирования, осталась непрореагировавшей. Полученные значения угла разворота θ могут быть выбраны в качестве критерия детонационной способности исследуемых низкочувствительных ВВ.

STUDY OF THE DETONATION WAVE TURNING IN INSENSITIVE HE SAMPLES

*A. E. Klischenko, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannkov, K. M. Prosvirnin, I. G. Galiullin,
K. M. Miroshkin, M. M. Bannikov*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

Onset and development of detonation in insensitive high explosives (HE) depend on several factors: density, dispersity, shock wave sensitivity, initiation pressure, etc. At the same time, under certain conditions there is a probability that detonation will propagate in the axial direction only, with the peripheral area remaining unreacted. In this case, the detonation wave (DW) propagation mode can be characterized as “channel”.

Experiments with samples of an insensitive TATB-based explosive (diameter: 60 mm; height: 50 mm) were carried out to study this nonstationary shock wave process. The HMX-based explosive samples (diameter: 20 mm; height: 30 mm; total initiator height: 60 mm) were used as an initiator. The studied samples were initiated along the HE sample axis ($R = 0$ mm), as well as with the $R/2$ axial offset (15 mm).

Photochronography was used to record profiles of the DW arrival to lateral and side surface. θ angle, the angle between the sample axis and the direction to the maximum DW turning point upon its arrival at the sample surface (lateral and/or side surface), was selected as a parameter characterizing the DW turning.

This experimental set up made it possible to obtain the DW turning angle (θ) values. With the HE sample initiated along its axis, we observed only axial (“channel”) propagation. When the initiation point was offset ($R/2$), the DW partial arrival at both surfaces (lateral and side) was observed. The peripheral HE sample area, distant from the initiation axis, remained unreacted. The obtained turning angle (θ) values can be used as a detonability criterion for the studied insensitive HEs.

2-18

МОДЕЛЬ РАЗЛОЖЕНИЯ ОКТОГЕНА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, М. М. Жукова, Д. А. Костеров

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва,
Россия

Исследования термической стойкости энергетических конденсированных веществ (ЭКС) в условиях линейного нагрева, (дифференциальный термический анализ (ДТА), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), термогравиметрический анализ (ТГА), ряд совмещенных методов, например, СТА (ДСК + ТГА + масс-спектрометр)), нашли широкое применение при получении экспериментальных данных термической стойкости ЭКС. Авторы с использованием формально-кинетического метода провели анализ имеющихся в литературе и полученных ими данных по разложению октогена в условиях линейного нагрева.

Расчет показывает, что при скорости нагрева $0,05^\circ\text{C}/\text{мин}$ скорость разложения октогена примерно в 3 раза больше, чем при скорости нагрева $1^\circ\text{C}/\text{мин}$. Увеличение m/v (m – масса образца, v – объем реакционной ячейки прибора) приводит к изменению модели с двумя лимитирующими стадиями до модели автокатализа второго порядка.

В условиях линейного нагрева скорость разложения октогена при $m/v = \rho$ примерно в 2,5 раза меньше, чем в статических условиях нагрева, при скоростях от $0,1$ до $0,35^\circ\text{C}/\text{мин}$ скорость разложения примерно в 3 раза больше, чем при скоростях от $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ и выше. Кинетика разложения описывается уравнением автокатализа второго порядка.

При скорости нагрева выше $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ и внешнем давлении $0,05$ ГПа экспериментальные данные удовлетворительно описываются уравнением автокатализа второго порядка, при скоростях $0,1$ – $0,35^\circ\text{C}/\text{мин}$ требуется модель с двумя лимитирующими стадиями, увеличение внешнего давления до $1,1$ ГПа приводит к увеличению скорости разложения, дальнейшее увеличение давления до $3,6$ ГПа – к замедлению скорости разложения октогена.

При скоростях нагрева от 16 до $100^\circ\text{C}/\text{с}$ для удовлетворительного описания экспериментальных данных по разложению октогена в расплаве требуется модель с двумя лимитирующими стадиями. С уменьшением скорости нагрева и увеличении давления происходит четкое разделение кривой на кривую с двумя максимумами. Повышение давления и m/v приводит к уменьшению величины энергии активации на стадии автокатализа.

HMX DECOMPOSITION MODEL UNDER DYNAMIC HEATING CONDITIONS

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, M. M. Zhukova, D. A. Kosterov

Central research institute of chemistry and mechanics, Moscow, Russia

Methods for studying the thermal stability of energetic condensed substances (ECS) under linear heating conditions, such as differential thermal analysis (DTA), differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), a number of combined methods, for example, STA (DSC + TGA + mass spectrometer), have found wide application in obtaining experimental data on the ECS thermal stability. Using the formal kinetic method authors analyzed the data available in the open sources and data obtained from the HMX decomposition under linear heating conditions.

The evaluation shows that at a heating rate of $0.05^\circ\text{C}/\text{мин}$, the HMX decomposition rate is about 3 times greater than at a heating rate of $1^\circ\text{C}/\text{мин}$. Increasing in m/v (m is the mass of the sample, v is the volume of the reaction cell of the device) leads the model changing from two limiting stages to the second-order autocatalysis model.

Under linear heating conditions, the HMX decomposition rate at $m/v = \rho$ is about 2.5 times less than under static heating conditions, at speeds from 0.1 to $0.35^\circ\text{C}/\text{мин}$, the decomposition rate is about 3 times greater than at speeds from $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ and higher. The kinetics of decomposition is described by the second-order autocatalysis equation.

At a heating rate above $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ and an external pressure of 0.05 ГПа, experimental data are satisfactorily described by the second-order autocatalysis equation, at heating rate from 0.1 to $0.35^\circ\text{C}/\text{мин}$ a model with two limiting stages is required, increasing external pressure to 1.1 ГПа leads to increasing the decomposition rate, a further increasing to 3.6 ГПа leads to slowing down the rate of decomposition of the HMX.

A data description of the HMX decomposition in the melt phase at heating rate from 16 to $100^\circ\text{C}/\text{с}$ requires a model with two limiting stages. Increasing the heating rate and pressure results into a clear division the curve into two maxima. Pressure and m/v increasing leads to decreasing the activation energy at the autocatalysis stage.

ДИНАМИКА, СИММЕТРИЯ И УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ «ПЫЛЕНИЕ» ПРИ КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ И ИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ УСКОРЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЛАЙНЕРОВ

С. В. Ерунов^{1,2}, В. А. Огородников^{1,2}, А. О. Бликов^{1,2}, В. Н. Князев¹, Е. В. Кулаков^{1,},
А. Б. Георгиевская^{1,2}, Н. Б. Давыдов¹, А. С. Соколова¹, Е. А. Чудаков¹, М. В. Жерноклетов¹,
А. В. Романов¹, А. В. Рыжков¹, А. С. Пупков¹, И. А. Блинов^{1,2}, В. А. Аринин¹, А. В. Котин¹,
В. А. Комраков¹, М. В. Антипов¹, А. П. Явтушенко¹*

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики 607188, Саров, Россия

²Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Для термоядерного зажигания дейтерий – тритиевой смеси ее необходимо нагреть до высокой температуры и сжать до большой плотности. Это может быть осуществлено, например, при ее цилиндрическом или сферическом сжатии металлическим лайнером и отраженной от геометрического центра устройства ударной волной. Однако реализация такого процесса связана с рядом особенностей: асимметрией и неустойчивостью схождения лайнера, засорением газовой смеси частицами материала окружающего ее лайнера при выходе на его внутреннюю поверхность ударной волны.

В данном сообщении продемонстрирована возможность минимизации асимметрии и подавления эффекта ударно-индуцированного «пыления» с внутренней границы цилиндрических лайнеров, разгоняемых с помощью энергии химического взрывчатого вещества путем их безударного квазиизэнтропического или изэнтропического ускорения до скоростей ~5–7 км/с в устройствах для сжатия замагниченной плазмы.

DYNAMICS, SYMMETRY AND SHOCK-INDUCED EJECTION AT QUASI-ISENTROPIC AND ISENTROPIC ACCELERATION OF CYLINDRICAL LINERS

S. V. Erunov^{1,2}, V. A. Ogorodnikov^{1,2}, A. O. Blikov^{1,2}, V. N. Knyazev¹, E. V. Kulakov^{1,},
A. B. Georgievskaya^{1,2}, N. B. Davydov¹, A. S. Sokolova¹, E. A. Chudakova¹, M. V. Zhernokletov¹,
A. V. Romanov¹, A. V. Ryzhkov¹, A. S. Pupkov¹, I. A. Blinov^{1,2}, V. A. Arinin¹, A. V. Kotin¹,
V. A. Komrakov¹, M. V. Antipov¹, A. P. Yavtushenko¹*

¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia.

²R. E. Alexeev Nizhegorodskiy state technical university, Nizhniy Novgorod, Russia

*E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

A deuterium – tritium mixture should be heated to high temperatures and compressed to high density for its thermonuclear ignition. The way to do this is, for example, through its cylindrical or spherical compression by a metal liner and a shock wave reflected from a geometric center of a device. However, the implementation of this process is linked to some peculiarities: asymmetry and instability of liner convergence, contamination of a gaseous mixture with material particles of a surrounding liner at exit of a shock wave to its inner surface.

The given work presents a possibility to minimize asymmetry and to suppress shock-induced ejection from inner boundaries of cylindrical liners being accelerated by the help of chemical explosive energy through their shock-free quasi-isentropic or isentropic acceleration up to ~5–7 km/s in devices for magnetized plasma compression.

2-20

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ С ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

С. А. Лаврук, Д. А. Тропин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск,
Россия

Исследование процесса взаимодействия детонационной волны с препятствиями разной проницаемости и является фундаментальной задачей и направлено на уменьшение разрушительных техногенных катастроф и при исследовании процесса перехода дефлаграционного горения в детонацию.

Рассматривается задача о взаимодействии гетерогенной детонационной волны в смеси алюминиевых частиц в кислороде с пористой вставкой, состоящей из набора цилиндров, конечного размера, перекрывающей всю ширину канала. Особенностью работы является то, что пористая вставка моделировалась не явно, а в пористой области, решалось дополнительное уравнение, учитывающее взаимодействие элементов пористой вставки с гетерогенной детонационной волной. В качестве численной модели использовалась модель взаимопроникающих континуумов. Система уравнений состоит из уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии для каждой из фаз (газ, горючие частицы и пористый элемент), замыкается уравнениями состояния и соотношениями для процессов массообмена между компонентами, обмена импульсами и теплообмена между газом и твердыми фазами (горючими частицами и инертной средой) [1, 2].

Для алюминиевых частиц диаметром 1 мкм и пористого фильтра с параметрами: диаметр элементов пористой вставки $d_3 = 50$ мкм, объемная концентрация инертной фазы $m_3 = 1,8 \cdot 10^{-3}$; получены результаты, представленные на рис. 1 (пунктирными линиями очерчено положение пористой вставки в расчетной области). Видно, что при увеличении длины пористой вставки с 40 см (рис. 1, а) до 45 см (рис. 1, б) происходит срыв детонации. При длине облака 40 см происходит локальное ослабление детонации, с последующим ре-инициированием детонации. На рис. 1, б представлены результаты для срыва детонационной волны, ширина пористого элемента составила 45 см. Видно, что при срыве детонации происходит постепенное выравнивание лидирующего фронта, а давление за лидирующим фронтом не превышает 30 атм.

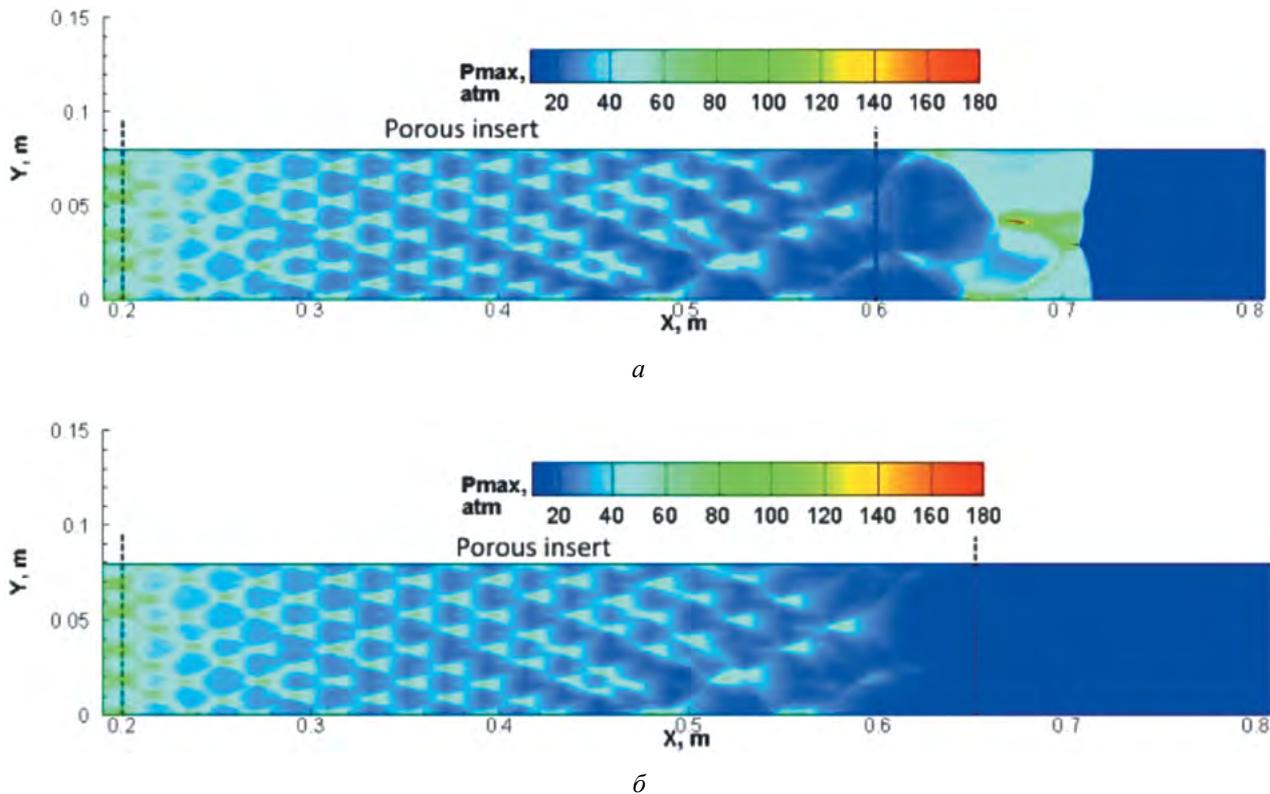


Рис. 1. Поля истории максимального давления для $d_2 = 1$ мкм, $d_3 = 50$ мкм, $m_3 = 1,8 \cdot 10^{-3}$.
 $a - L = 40$ см, $b - L = 45$ см

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>

Литература

1. **Lavruk, S. A.** Investigation of Heterogeneous Detonation Wave Interaction with Porous Medium [Text] / S. A. Lavruk, D. A. Tropin // *Combustion Science and Technology*. – 2023. (в печати)
2. **Lavruk, S. A.** Simulation of heterogeneous detonation interaction with porous insert [Text] / S. A. Lavruk, D. A. Tropin // *Combustion and Explosion*. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – P. 63–70.

NUMERICAL SIMULATION OF HETEROGENEOUS DETONATION INTERACTION WITH FINITE LENGTH POROUS INSERTS WITH

S. A. Lavruk, D. A. Tropin

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The study of the process of interaction of a detonation wave with obstacles of different permeability is a fundamental task and is aimed at reducing destructive man-made disasters and in studying the process of deflagration to detonation transition.

The problem of the interaction of a heterogeneous detonation wave in a mixture of aluminum particles in oxygen with a porous insert consisting of a set of cylinders of finite size covering the entire width of the channel is considered. A feature of the work is that the porous insert was modeled implicitly, in the porous region, an additional equation was solved that takes into account the interaction of the elements of the porous insert with a heterogeneous detonation wave. The model of interpenetrating continua was used

as a numerical model. The system of equations consists of equations of the laws of conservation of mass, momentum, and energy for each of the phases (gas, combustible particles, and porous element), is closed by equations of state and relations for the processes of mass transfer between components, momentum exchange, and heat transfer between gas and solid phases (combustible and inert particles) [1, 2].

For aluminum particles with a diameter of $1 \mu\text{m}$ and a porous filter with the following parameters: diameter of the elements of the porous insert $d_3 = 50 \mu\text{m}$, volume concentration of the inert phase $m_3 = 1,8 \cdot 10^{-3}$; the results presented in fig. 1 (dotted lines outline the position of the porous insert in the computational domain). It can be seen that with an increase in the length of the porous insert from 40 cm (fig. 1, *a*) to 45 cm (fig. 1, *b*), detonation is attenuate. At a cloud length of 40 cm (fig. 1, *a*), local weakening of detonation occurs, followed by re-initiation of detonation. On fig. 1, *b* shows the results for detonation failure, the width of the porous element was 45 cm. It can be seen that when the detonation is attenuate, the leading front gradually flattening, and the pressure behind the leading front does not exceed 30 atm.

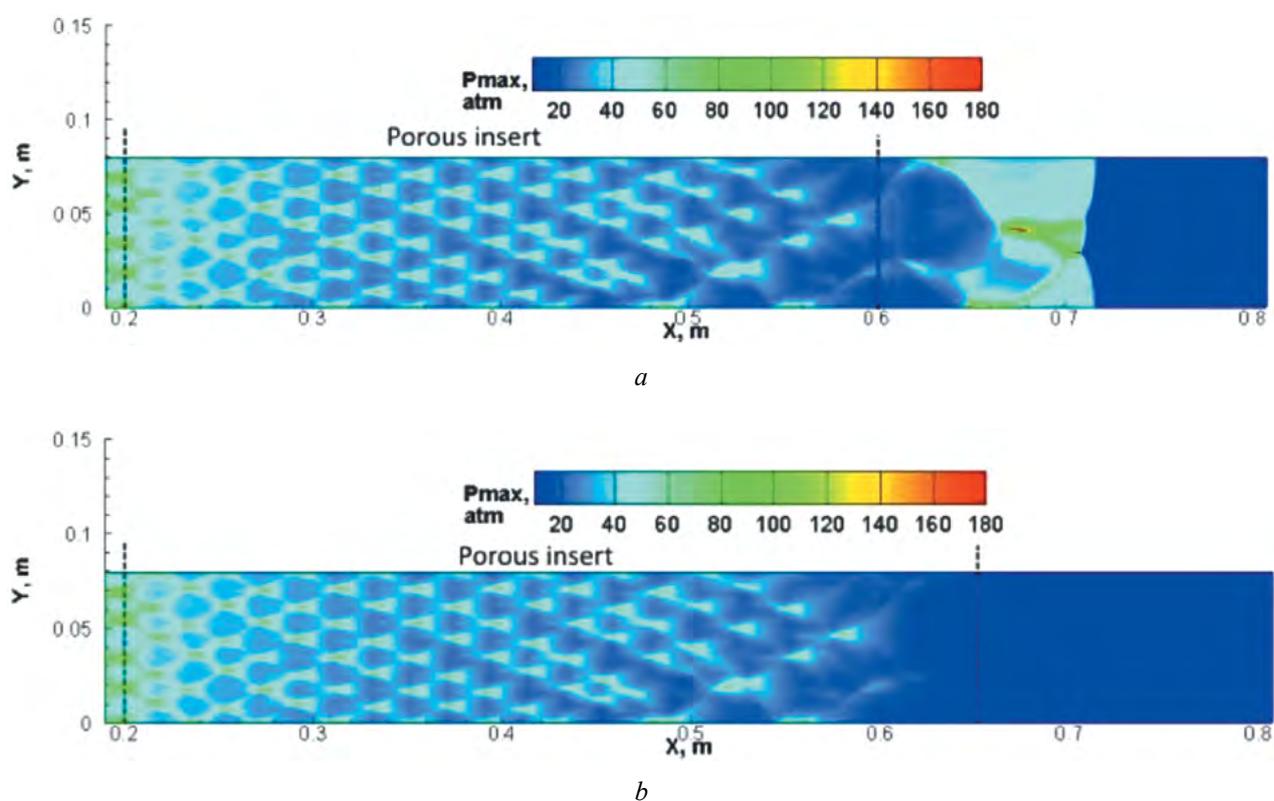


Fig. 1. Maximal pressure fields in $d_2 = 1 \mu\text{m}$, $d_3 = 50 \mu\text{m}$, $m_3 = 1,8 \cdot 10^{-3}$.

a – $L = 40 \text{ cm}$, *b* – $L = 45 \text{ cm}$

The work was supported by Russian Science Foundation, project No. 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>

References

1. **Lavruk, S. A.** Investigation of Heterogeneous Detonation Wave Interaction with Porous Medium [Text] / S. A. Lavruk, D. A. Tropin // *Combustion Science and Technology*. – 2023. (в печати)
2. **Lavruk, S. A.** Simulation of heterogeneous detonation interaction with porous insert [Text] / S. A. Lavruk, D. A. Tropin // *Combustion and Explosion*. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – P. 63–70.

2-21

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО МАТЕРИАЛА ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА

А. А. Лачугин, А. А. Марсов, А. С. Петров, А. А. Мокеев, Я. О. Павлова

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия

В технологиях интенсификации отдачи нефтяных пластов значительное место занимают устройства на основе энергонасыщенных материалов (ЭНМ), применяемых для оказания высокоэнергетического воздействия на пласт. Одним из перспективных методов увеличения нефтеотдачи является технология газодинамического разрыва пласта. Метод заключается в создании избыточного давления продуктами сгорания заряда из ЭНМ в интервале перфорации скважины. Благодаря давлению, превышающему горное давление в теле нефтяного пласта, формируется сеть трещин. Благодаря этому увеличивается поверхность фильтрации нефтяного пласта и увеличивается дебит скважины.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований энергонасыщенного материала на основе лакового коллоксилина и инертных связующих, с целью оценки потенциальной возможности применения этих составов в условиях нефтяной скважины. Задача поиска альтернативных материалов для выполнения технологии газодинамического разрыва пласта является актуальной в рамках программы импортозамещения. Экспериментальные образцы изготавливались методом прессования в виде цилиндрических шашек диаметром 65 мм с осевым каналом 15 мм, что соответствует размерам штатных зарядов, применяемых на промыслах. Образцы погружались в цилиндрический сосуд стендовой установки заполненную водой, имитирующей скважинную жидкость. Инициирование осуществлялось электрическим импульсом. Результаты эксперимента регистрировались в виде экспериментальной кривой зависимости избыточного давления в сосуде стендовой установки от времени процесса горения экспериментального образца (рис. 1).

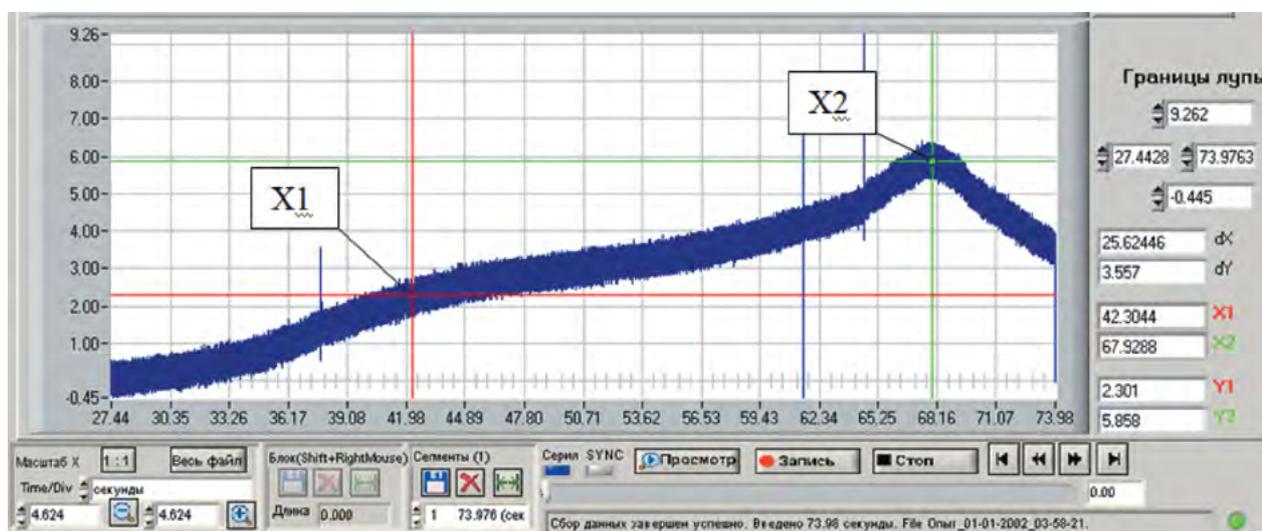


Рис. 1. Экспериментальная кривая

По результатам исследований установлено, что наиболее близким к промышленным образцам зарядов по скорости горения является состав коллоксилин/олеиновая кислота в соотношении 85/15, помещенные в герметичный корпус (33,4 мм/с в диапазоне давлений 0,8–8,2МПа). Образцы этого состава были рекомендованы для проведения испытаний в полигонных условиях.

STUDY OF THE FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF ENERGYSATURATED MATERIAL INTENDED FOR GAS-DYNAMIC FRACTURING OF OIL RESERVOIR

A. A. Lachugin, A. A. Marsov, A. S. Petrov, A. A. Mokeev, Ya. O. Pavlova

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

The devices, which are based on energysaturated materials (ENM), used to provide high-energy effect on the reservoir, take a significant place in technologies of intensifying the oil recovery of oil reservoirs. One of the prospective methods of increasing the oil recovery is the technology of gas-dynamic fracturing. The method is to create the excess pressure by products combustion of the charge from the ENM in the well perforation interval. Due to the pressure, which is exceeding the ground pressure in the body of the oil reservoir, a fracture network is formed. According to this the filtration surface of the oil reservoir and the well rate increase.

The results of the experimental studies of an energy-saturated material based on lacked colloxylin and inert binders in order to evaluate the potential application of these compositions in oil well conditions are given in this paper. The task of search for the alternative materials for the implementation of the technology of gas-dynamic fracturing is relevant in the framework of the import substitution program. The experimental models were made by pressing in the form of cylindrical grain with a diameter of 65 mm and an axial channel of 15 mm, which corresponds to the size of standard charges used in the fields. The examples were immersed in a cylindrical vessel of a test bench installation filled with water, simulating a well fluid. The initiation was done by an electrical impulse. The results of the experiment were recorded in the form of an experimental curve of the dependence of the excess pressure in the test bench installation vessel on the time of the experimental model combustion (fig. 1).

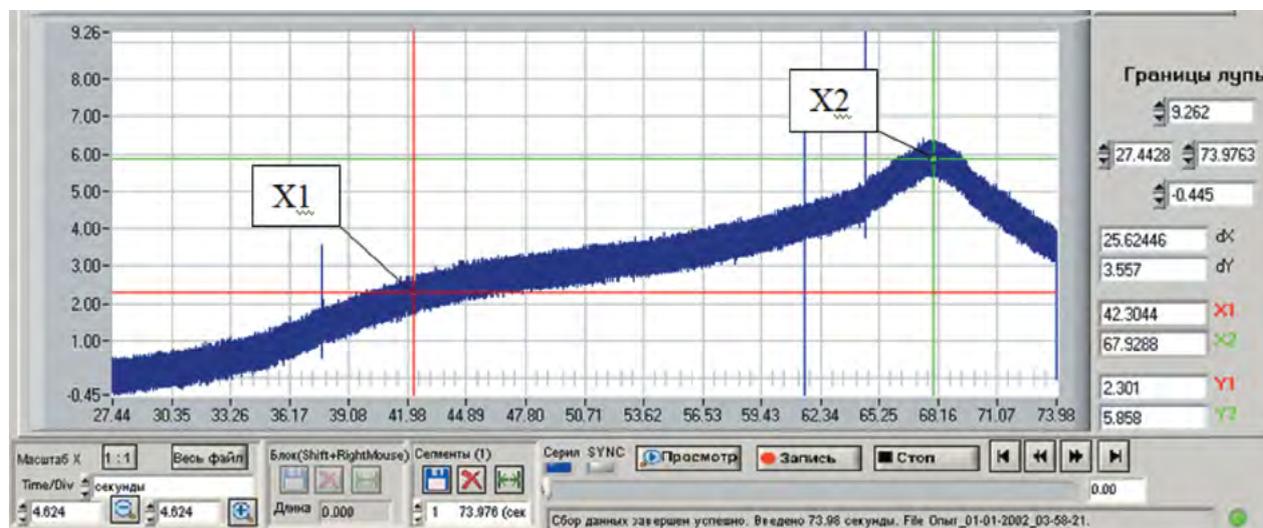


Fig. 1. Experimental curve

According to the results of the research, it was found that the composition of colloxylin / oleic acid in the ratio of 85/15, placed in a hermetic enclosure (33.4 mm/s in the pressure range of 0.8–8.2 MPa), is the closest to industrial models of charges in terms of burning rate. Samples of this composition were recommended for testing in field conditions.

2-22

ПРИМЕНЕНИЕ СОПЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ТОПЛИВ

*К. С. Рогаев, А. С. Дьячковский, А. Н. Ищенко, Н. М. Саморокова,
Е. Ю. Степанов, А. Д. Сидоров*

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Перед испытаниями новых топлив в ствольных системах выполняется исследование горения новых перспективных топлив в условиях полузамкнутого объема (сопловой бомбе) [1, 2]. Одной из особенностей сопловой установки является неподвижность горящего заряда, что является ключевым фактором, исключаяющим влияние процесса ускорения исследуемого заряда, состоящего из исследуемых топлив [3]. В отличие от испытаний в манометрической бомбе, характеризующейся низкой плотностью заряжения (до 0,2 г/см³), при исследовании горения новых топлив в условиях сопловой бомбы возможна реализация плотностей заряжения заряда, соответствующих артиллерийскому выстрелу.

В данной работе представлена экспериментальная методика определения законов горения топлив в условиях сопловой бомбы при различных условиях истечения, на примере модельных высокоплотных топлив.

Общая схема сопловой бомбы высокого давления с истечением представлена на рис. 1. Высокоплотное топливо располагалось в полиэтиленовом контейнере, для реализации торцевого режима горения. В качестве воспламенителя заряда используется пироксилиновый порох и капсуль. В цилиндрическую часть солового блока помещается полиэтиленовая или текстолитовая «пробка» позволяющая регулировать максимальное давление в камере сгорания.

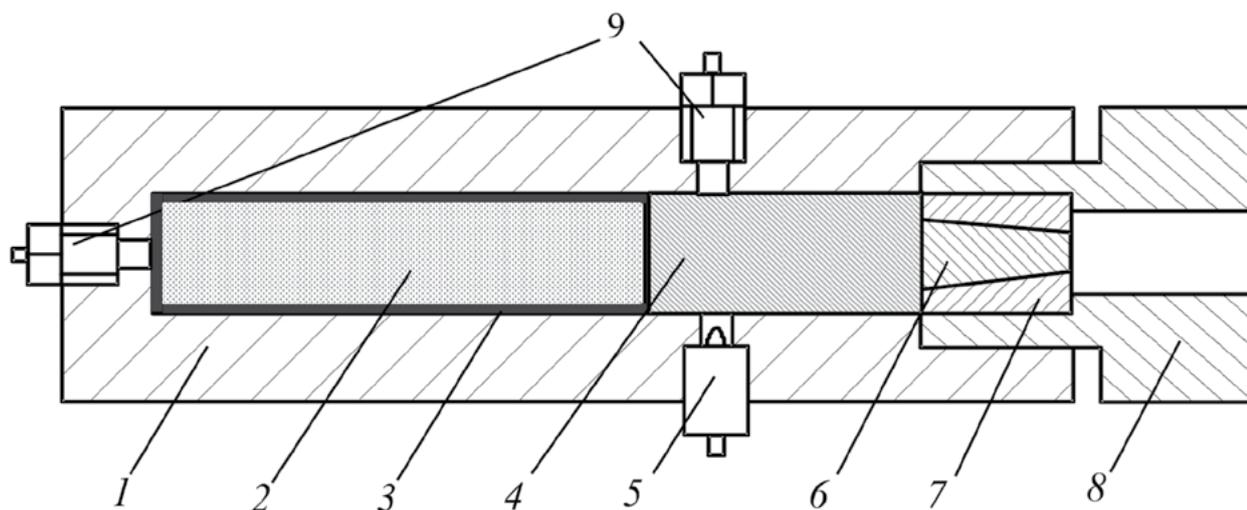


Рис. 1. Общая схема сопловой бомбы с истечением:

1 – корпус; 2 – топливо; 3 – контейнер; 4 – порох воспламенитель; 5 – воспламенительное устройство; 6 – пробка; 7 – сопло; 8 – сопловой блок; 9 – датчики давления

В рамках выполненного исследования рассмотрено горение высокоплотных топлив в условиях сопловой бомбы при различных конфигурациях соплового блока. Исследованы различные способы открытия соплового блока. Получены законы горения исследуемых топлив, в условиях замкнутого объема (пока сопло остается закрытым) и при истечении газа через сопло (при открытии сопла). Полученные законы горения топлива в сопловой установке позволяют с высокой точностью оценить поведение данных топлив в ствольных установках и детально рассмотреть газодинамические процессы, сопровождающие выстрел.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10054, <https://rscf.ru/project/21-79-10054/>

Литература

1. **Серебряков, М. Е.** Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет [Текст]. – М. : Оборонгиз, 1962. – 703 с.
2. **Ермолаев, Б. С.** Конвективное горение блочных зарядов из семиканальных пороховых зерен, ингибированных поливинилбутиралем [Текст] / Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов, А. В. Романьков, В. Е. Храповский, А. А. Беляев, А. Б. Кроули // Химическая физика. – 2015. – Том 34, № 5. – С. 1–11.
3. **Буркин, В. В.** Исследование горения пастообразного топлива при различных схемах заряжания [Текст] / В. В. Буркин, А. С. Дьячковский, А. Н. Ищенко, В. З. Касимов, К. С. Рогаев, Н. М. Саморокова // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика – 2020. – № 67. – С. 89–101.

THE USE OF A NOZZLE INSTALLATION FOR STUDYING THE PECULIARITIES OF COMBUSTION OF HIGH-DENSITY PROPELLANTS

*K. S. Rogaev, A. S. D'yachkovskij, A. N. Ishhenko, N. M. Samorokova,
E. Yu. Stepanov, A. D. Sidorov*

National research Tomsk State University, Russian Federation, Tomsk, Russia

Before testing new propellants in gun systems, the combustion of new prospective propellants is studied in a semi-closed volume (a nozzle bomb) [1, 2]. One of the peculiarities of the nozzle installation is the immobility of the burning charge, which is a key factor that eliminates the influence of the acceleration process of the investigated charge consisting of the tested propellants [3]. Unlike tests in a manometric bomb, characterized by low charge density (up to 0.2 g/cm³), the combustion of new propellants can be studied in conditions of a nozzle bomb with charge densities corresponding to artillery firing.

This paper presents an experimental methodology for determining the laws of propellant combustion in conditions of a nozzle bomb under different exhaust conditions, using model high-density propellants as an example.

The general schematic of a high-pressure nozzle bomb with a bypass is shown in picture 1. High-density propellant was stored in a polyethylene container for the implementation of the combustion end mode. Pyrotechnic powder and a capsule are used as the charge igniter. A polyethylene or textolite “plug” is placed in the cylindrical part of the nozzle block, allowing for the regulation of the maximum pressure in the combustion chamber.

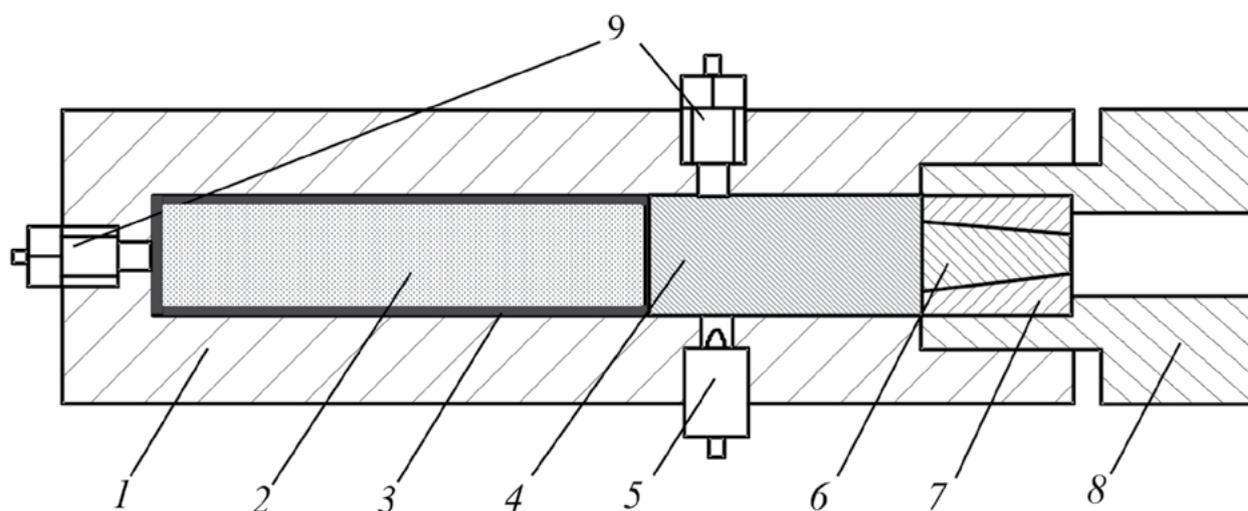


Fig. 1. General schematic of a high-pressure nozzle bomb with a bypass:

1 – casing; 2 – propellant; 3 – container; 4 – powder igniter; 5 – ignition device; 6 – plug; 7 – nozzle; 8 – nozzle block;
9 – pressure sensors

As part of the conducted research, the combustion of high-density propellants in conditions of a nozzle bomb was studied under various configurations of the nozzle block. Different ways of opening the nozzle block were investigated. The laws of combustion of the propellants being studied were determined in the conditions of a closed volume (while the nozzle remains closed) and during gas exhaust through the nozzle (when the nozzle is opened). The determined laws of propellant combustion in a nozzle system allow for highly accurate estimation of the behavior of these fuels in gun systems and detailed examination of the gas dynamic processes accompanying the shot.

The study was carried out at the expenses of the grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-79-10054), <https://rscf.ru/en/project/21-79-10054/>.

References

1. **Serebryakov, M. E.** Internal ballistics of barrel systems and powder rockets [Text]. – M. : Oborongiz, 1962. – 703 p.
2. **Ermolaev, B. S.** Convective combustion of block charges from seven-channel powder grains inhibited by polyvinyl butyral [Text] / B. S. Ermolaev, A. A. Sulimov, A. V. Roman'kov, V. E. Khrapovsky, A. A. Belyaev, A. B. Crowley // Chemical Physics. – 2015. – Vol. 34, No. 5. – С. 1–11.
3. **Burkin, V. V.** Study of the paste-like propellant combustion at various loading schemes [Text] / V. V. Burkin, A. S. D'yachkovskiy, A. N. Ishchenko, V. Z. Kasimov, K. S. Rogaev, N. M. Samorokova // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. – 2020. – No. 67. – С. 89–101.

2-23

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ИЗУЧЕНИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

*И. А. Рубцов^{1,2}, К. А. Тен², Э. Р. Прууэл², А. О. Кашкаров², А. А. Студенников^{1,2},
В. П. Халеменчук², Я. В. Зубавичус¹, К. Э. Купер¹, А. В. Бухтияров¹, Б. П. Толочко³*

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

В рамках реализации проекта ЦКП «СКИФ» предполагается строительство 30 экспериментальных станций, одной из которых является Станция 1–3 «Быстропротекающие процессы», сдача которой ожидается в 2024 году. Одной из основных экспериментальных методик, реализованных на Станции, будет методика малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением (МУРР).

Эксперименты по МУРР для изучения быстропротекающих процессов (например, при детонации взрывчатых веществ) совместно проводятся ИГиЛ СО РАН и ИЯФ СО РАН начиная с 2000-х годов. Одной из основных целей этих экспериментов является восстановление динамики конденсации углерода путем анализа распределений МУРР за фронтом детонации, измеренных в режиме реального времени.

Данная работа посвящена развитию подходов к использованию высокоэнергетических пучков для реализации на станциях ЦКП «СКИФ», а именно совершенствованию методики малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением. Разобраны примеры применения данной методики в исследовании быстропротекающих процессов: изучение конденсации углерода в процессе детонации, изучение процесса реагирования наноструктурированных взрывчатых веществ, горение и детонация составов с добавлением алюминия и бора, а также детонационный синтез наночастиц металлов. Приведены концептуальные решения, которые будут применены на Станции «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ» при исследовании быстропротекающих процессов,

для совершенствования методики, что позволит существенно увеличить качество получаемых экспериментальных данных и продвинуется вперед при изучении процесса детонации взрывчатых веществ.

APPLICATION OF THE TECHNIQUE OF SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING IN THE STUDY OF FAST-FLOWING PROCESSES

I. A. Rubtsov^{1,2}, K. A. Ten², E. R. Prueel², A. O. Kashkarov², A. A. Studennikov^{1,2}, V. P. Khalemenchuk², Ya. V. Zubavichus¹, K. E. Kuper¹, A. V. Bukhtiyarov¹, B. P. Tolochko³

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

²SRF "SKIF" Boreskov Institute of Catalysis, SB RAS, Kol'tsovo, Russia

³Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Novosibirsk, Russia

As part of the implementation of the SKIF project, it is planned to build 30 beamlines (experimental stations), one of which is Station 1–3 "Fast Processes", which is expected to be commissioned in 2024. One of the main experimental techniques implemented at the Station will be time-resolved small-angle X-ray scattering (SAXS).

SAXS experiments to studying fast processes (for example, during the detonation of explosives) have been jointly carried out by LIH SB RAS and BINP SB RAS since the 2000s. One of the main purpose of these experiments is to reconstruct the dynamics of carbon condensation by analyzing SAXS patterns behind the detonation front, measured in real time.

This work is devoted to the development of approaches to the use of high-energy beams for implementation at the SRF "SKIF" stations, namely, the improvement of the technique of small-angle X-ray scattering with high temporal resolution. Examples of the application of this technique in the study of fast processes are analyzed: the study of carbon condensation during detonation, the study of the reaction process of nanostructured explosives, the combustion and detonation of compositions with the addition of aluminum and boron, and the detonation synthesis of metal nanoparticles. Conceptual solutions are presented that will be applied at the SRF "SKIF" Station "Fast Processes" in the study of fast processes, to improve the methodology, which will significantly increase the quality of the experimental data obtained and move forward in the study of detonation process of high explosives.

2-24

ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Г. Г. Савенков^{1,2,3}, У. М. Побережная^{1,3}, В. М. Фрейман¹, А. Г. Зегря¹, А. А. Карпова¹, Д. В. Фадеев⁴, Г. Г. Зегря¹

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Москва, Россия

²АО «Машиностроительный завод «Армалит», Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

⁴АО «Муромский приборостроительный завод», Муром, Россия

В настоящее время одним из перспективных типов новых энергетических композитов (ЭНК) является пористый кремний (por-Si), изготавливаемый по технологии электрохимического травления монокристаллического кремния в электролитах на основе плавиковой кислоты. Структура кремния, образующаяся в процессе такого травления, имеет удельную поверхность, превосходящую сотни м²/г [1] (рис. 1). Размеры пор в зависимости от параметров технологического процесса лежат в диапазоне от единиц нанометров до нескольких микрометров. Такая структура приводит к необычным и уни-

кальным свойствам por-Si , например, он может гореть в чистом виде, а в сочетании с определенными окислителями у него появляется способность к взрыву (детонации) [2, 3].

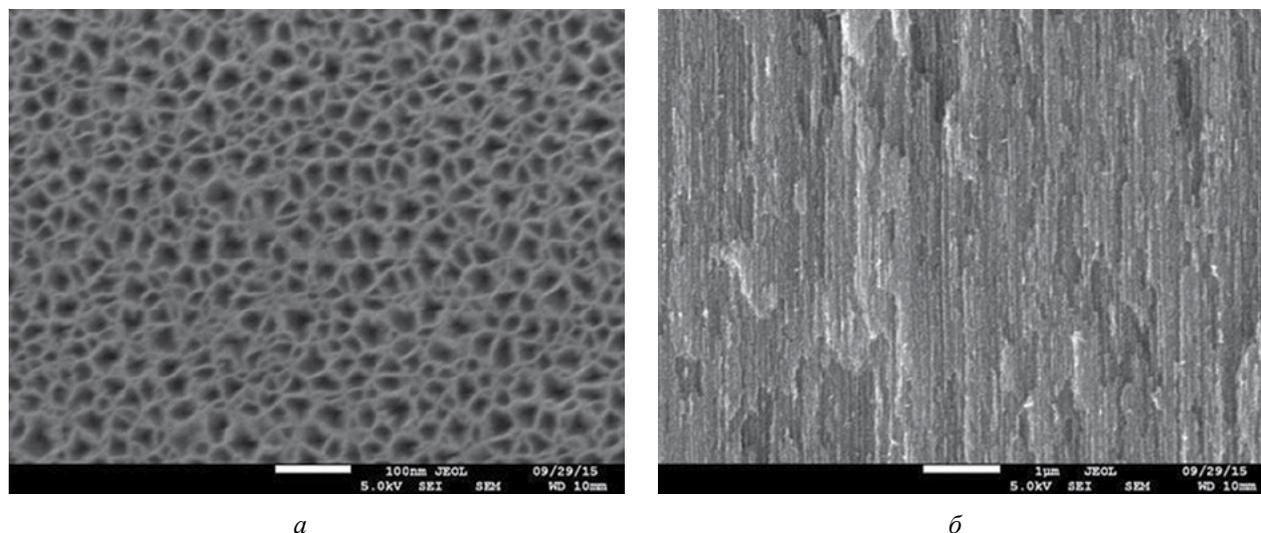


Рис. 1. Снимки поверхности наноструктурированного пористого кремния (а) и поперечного скола пористого кремния (б), полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа

В докладе представлены результаты проведенных исследований по инициированию в ЭНК на основе пористого кремния с различными окислителями и добавками процессов горения и взрыва. Иницирование осуществлялось с помощью теплового источника (накаляющимся проводником), лазерного излучения и сильноточного электронного пучка.

Полученные результаты показали, что основными действующими факторами взрывчатого превращения ЭНК на основе наноструктурированного пористого кремния являются: механический импульс (длительностью около микросекунды); короткий световой импульс (длительностью несколько наносекунд) и короткий электромагнитный импульс (несколько наносекунд).

Литература

1. **Зегря, А. Г.** Влияние уровня легирования исходных монокристаллов кремния на параметры структуры пористого кремния, полученного методом электрохимического травления [Текст] / А. Г. Зегря, В. В. Соколов, Г. Г. Зегря, Ю. В. Ганин, Ю. М. Михайлов // Письма ЖТФ. – 2019. – Т. 45. – Вып. 21. – С. 3–6.
2. **Савенков, Г. Г.** Возможности энергонасыщенных композитов на основе нанопористого кремния (обзор и новые результаты) [Текст] / Г. Г. Савенков, А. Г. Зегря, Г. Г. Зегря, Б. В. Румянцев, А. Б. Синани, Ю. М. Михайлов // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – Вып. 3. – С. 397–403
3. **Савенков, Г. Г.** Скорость горения порошкообразного пористого кремния в условиях ограниченного пространства [Текст] / Г. Г. Савенков, А. И. Козачук, У. М. Побережная, В. М. Фрейман, Г. Г. Зегря // Письма в ЖТФ. – 2022. – Т. 47. – Вып. 4. – С. 7–10.

ENERGY-SATURATED COMPOSITES BASED ON NANOSTRUCTURED POROUS SILICON

G. G. Savenkov^{1,2,3}, U. M. Poberezhnaya^{1,3}, V. M. Freiman¹, A. G. Zegrya¹, A. A. Karpova¹,
D. V. Fadeev⁴, G. G. Zegrya¹

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

²Machine-Building Plant "Armalit", St. Petersburg, Russia

³St. Peterburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia

⁴Murom Device-Making Plant, Murom, Russia

Currently, one of the promising types of new energy composites (EC) is porous silicon (por-Si), manufactured using the technology of electrochemical etching of monocrystalline silicon in hydrofluoric acid-based electrolytes. The silicon structure formed during such etching has a specific surface area exceeding hundreds of m²/g [1] (fig.1). The pore sizes, depending on the parameters of the technological process, range from units of nanometers to several micrometers. This structure leads to unusual and unique properties of por-Si, for example, it can burn in its pure form, and in combination with certain oxidizing agents it has the ability to explode (detonation) [2, 3].

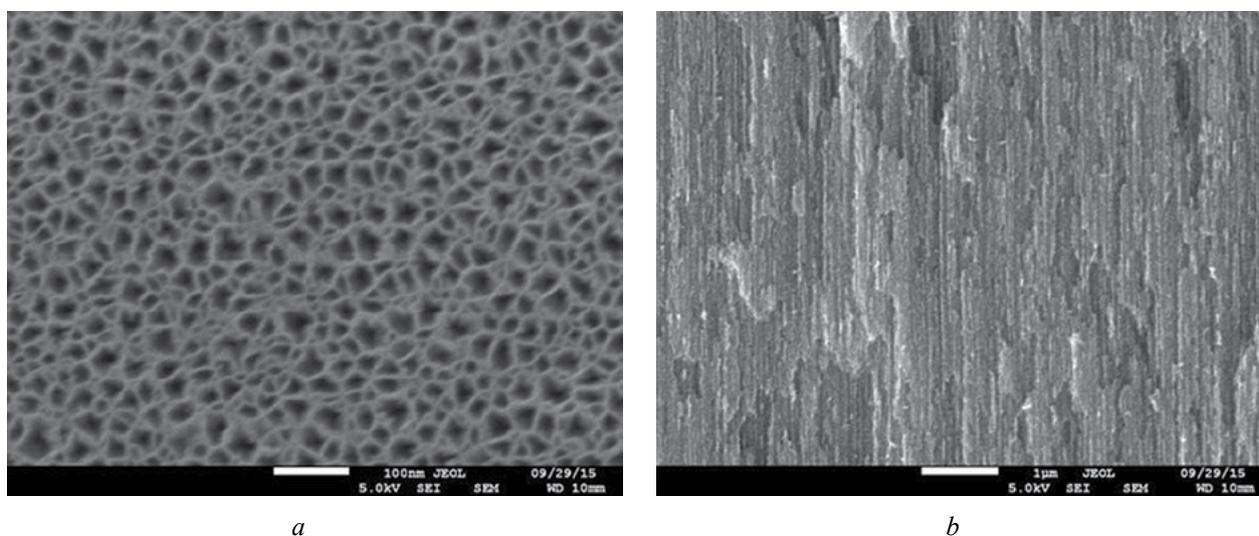


Fig. 1. Images of the surface of nanostructured porous silicon (a) and the transverse cleavage of porous silicon (b) obtained using a scanning electron microscope

The report presents the results of the conducted research on the initiation of combustion and explosion processes in the EC based on porous silicon with various oxidants and additives. Initiation was carried out using a thermal source (an incandescent conductor), laser radiation and a high-current electron beam.

The obtained results showed that the main active factors of explosive transformation of energy composites based on nanostructured porous silicon are: a mechanical pulse (lasting about a microsecond); a short light pulse (lasting several nanoseconds) and a short electromagnetic pulse (several nanoseconds).

References

1. **Zegrya, A. G.** The Effect of the Doping Level of Starting Silicon Single Crystals on Structural Parameters of Porous Silicon Produced by Electrochemical Etching [Text] / A. G. Zegrya, V. V. Sokolov, G. G. Zegrya, Y. V. Ganin, Y. M. Mikhailov // Tech. Phys. Lett. – 2019. – Vol. 45. – Iss. 11. – P. 1067–1070.
2. **Savenkov, G. G.** The possibilities of energy-saturated nanoporous silicon composites (review and new results) [Text] / G. G. Savenkov, A. G. Zegrya, G. G. Zegrya, B. V. Rummyantsev, A. B. Sinani, Y. M. Mikhailov // Technical Physics. – 2019. – Vol. 64, No. 3. – P. 361–367.

3. **Savenkov, G. G.** Combustion rate of powdered porous silicon with limited space [Text] / G. G. Savenkov, A. I. Kozachuk, U. M. Poberezhnaya, V. M. Freiman, G. G. Zegrya // *Technical Physics Letters*. – 2022. – Vol. 48, No. 2. – P. 57–59.

2-25

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСФТАЛАТНЫХ ПЛАСТИФИКАТОРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПЛАСТИЧНОГО ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО МАТЕРИАЛА ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*А. С. Сальников¹, А. С. Куражов¹, Н. И. Сальникова¹, Е. А. Борисова¹,
Д. А. Борисов¹, П. В. Кочнев²*

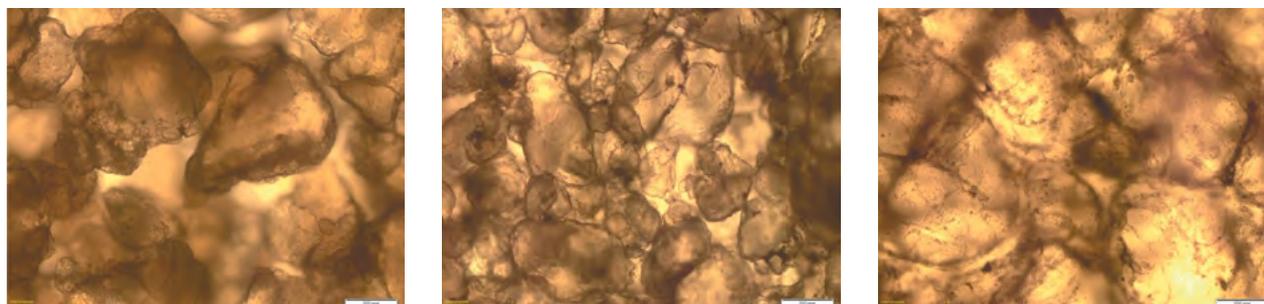
¹ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия

²Проектный институт «СоюзХимПромПроект», Казань, Россия

Пластичные энергонасыщенные материалы (ПЭНМ) находят широкое применение в технологиях импульсной обработки металлов. Постоянный рост требований к металлоконструкциям различного назначения, в свою очередь, обуславливает необходимость разработки новых и совершенствования технологии приготовления существующих энергонасыщенных материалов, применяемых для данных целей [1].

Одним из основных недостатков, существующих пластичных энергонасыщенных материалов является длительность и трудоемкость подготовки связующего на основе полиизобутилена ПИБ-200. Решением данной проблемы стал разработанный в ФГБОУ ВО «КНИТУ» пластичный энергонасыщенный материал, содержащий, %: RDX – 80–85, связующее на основе каучука – 15–20%. Связующее представляет собой каучук марки СКН-26 в порошкообразном виде с дисперсностью менее 1 мм, пластифицированный дибутилфталатом (ДФФ) в соотношении 1:2. Применение порошкообразного каучука позволило существенно сократить длительность подготовки связующего ввиду его пластификации непосредственно в процессе смешения с наполнителем [2]. Однако высокая токсичность дибутилфталата и общая мировая тенденция замены токсичных пластификаторов обуславливает необходимость поиска новых, бесфталатных пластификаторов в составах ПЭНМ [3].

В качестве потенциальной замены компонента в составе, рассматривались такие пластификаторы, как диоктилсебацат (ДОС), триацетин (ТА) и ЭДОС, являющиеся, по-сравнению, с ДБФ, малотоксичными. Исследование возможности использования данных пластификаторов в составе ПЭНМ проводили по структуре связующего в соотношении полимер/пластификатор равном 1:1 на оптическом микроскопе Olympus VX-51 (увеличение $\times 50$). Время выдержки каучука в пластификаторе составляло 1 сутки. Наиболее однородное связующее наблюдалось при использовании пластификатора ЭДОС (рис. 1).



a

б

в

Рис. 1. Связующее на основе каучука СКН-26 с бесфталатными пластификаторами.

a – скн-26/ДОС; *б* – скн-26/ТА; *в* – скн-26/ЭДОС

На основе полученных данных, был изготовлен пластичный энергонасыщенный материал, содержащий, %: RDX – 80–85, SKN-26/ЭДОС в соотношении 1:2 – 15–20%. Полученный ПЭНМ обладает пластичностью (усадкой) на уровне 14%, практически нечувствителен к удару; скорость детонации превосходит на 10% данный показатель состава-аналога.

Литература

1. Селиванов, В. В. Взрывные технологии [Текст] : учебник для вузов / В. В. Селиванов, И. Ф. Кобылкин, С. А. Новиков. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 519, [1] с. : ил.
2. Сальников, А. С. [и др.] Разработка пластичных взрывчатых составов на основе порошкообразного эластомера [Текст] // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 19. – С. 75–77.
3. Шкаева, И. Е. [и др.] Токсичность и опасность фталатов [Текст] // Токсикологический вестник. – 2019. – № 6 (159). – С. 3–9.

THE USE OF PHTHALATE-FREE PLASTICIZERS IN THE DEVELOPMENT OF PLASTIC ENERGETIC MATERIAL FOR INDUSTRIAL USE

A. S. Salnikov¹, A. S. Kyrzhov¹, N. I. Salnikova¹, E. A. Borisova¹, D. A. Borisov¹, P. V. Kochnev²

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian

²Design Institute “Soyuzkhimpromproekt”, Kazan, Russian

Plastic energetic materials (PEM) are widely used in pulse metal processing technologies. The constant growth of requirements for metal structures for various purposes, in turn, necessitates the development of new and improved technology for the preparation of existing energetic materials used for these purposes [1].

One of the main disadvantages of existing plastic energy-saturated materials is the duration and complexity of preparing a binder based on polyisobutylene PIB-200. The solution to this problem was a plastic energy-saturated material developed at KNITU, containing, %: RDX – 80–85, a binder based on rubber – 15–20%. The binder is a rubber of the brand SKN-26 in powdered form with a dispersion of less than 1 mm, plasticized with dibutyl phthalate (DBF) in a ratio of 1:2. The use of powdered rubber has significantly reduced the preparation time of the binder due to its plasticization directly in the process of mixing with the filler [2]. However, the high toxicity of dibutyl phthalate and the general global trend of replacing toxic plasticizers necessitates the search for new, phthalate-free plasticizers in PEM formulations [3].

As a potential replacement of the component in the composition, plasticizers such as dioctyl sebacinate (DOS), triacetin (TA) and EDOS, which are, in comparison with DBF, low-toxic, were considered. The study of the possibility of using these plasticizers as part of a PC was carried out according to the binder structure in a polymer/plasticizer ratio equal to 1:1 on an Olympus BX-51 optical microscope (magnification $\times 50$). The exposure time of rubber in the plasticizer was 1 day. The most homogeneous binder was observed when using the plasticizer EDOS (fig. 1).

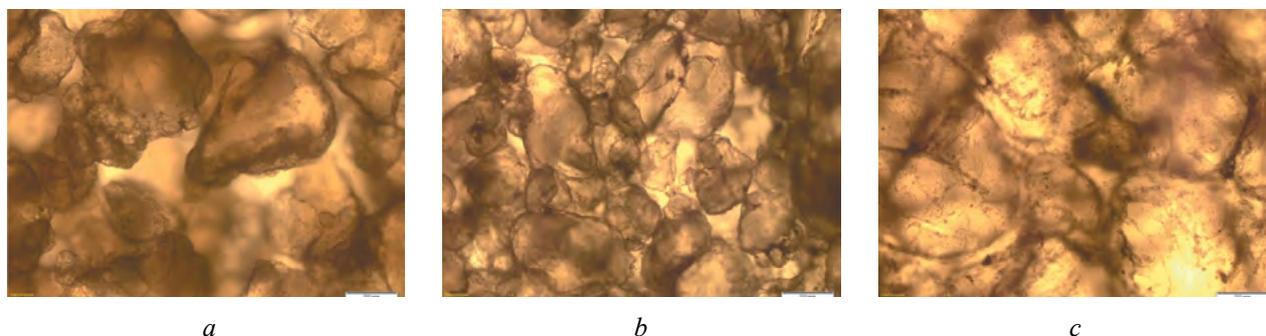


Fig. 1. Binder based on SKN-26 rubber with phthalate-free plasticizers.

a – skn-26/DOS; *b* – skn-26/TA; *c* – skn-26/EDOS

Based on the data obtained, a plastic energetic material was manufactured containing, %: RDX – 80–85, SKN-26/EDOS in a ratio of 1:2 – 15–20 %. The resulting PEM has plasticity (shrinkage) at the level of 14%, insensitive to shock; the detonation velocity exceeds by 10% these indicators for the analog composition.

References

1. **Selivanov, V. V.** Explosive technologies [Text] : textbook for universities / V. V. Selivanov, I. F. Kobylkin, S. A. Novikov. – 2nd ed., reprint. and additional – М. : Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2014. – 519, [1] p. : il.
2. **Shkaeva, I. E.** [et al.] Toxicity and danger of phthalates [Text] // Toxicological Bulletin. – 2019. – № 6 (159). – P. 3–9;
3. **Salnikov, A. S.** [et al.] Development of plastic explosive compositions based on powdered elastomer [Text] // Bulletin of the Technological University. – 2016. – Vol. 19, No. 19. – P. 75–77.

2-26

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВЛЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МАЛОПЛОТНОГО ЗАРЯДА ТРОТИЛА

*Н. П. Сатонкина^{1,2}, А. П. Еришов¹, А. О. Кашкаров¹, И. А. Рубцов¹, А. А. Кузьминых²,
С. С. Пудова², М. С. Терехова²*

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В физике детонации известно наличие зависимости между скоростью детонации D и диаметром заряда d при фиксированной плотности заряда. При этом, участок зависимости $D(d)$ можно сократить, а предельный диаметр существенно уменьшить, изменяя структуру. Так, в работе [1] исследованы заряды литого тротила с разным способом изготовления, следствием чего было формирование крупно- и мелкокристаллической структуры, критический диаметр зарядов которых отличался в ≈ 2 раза (27,5 и 15 мм). Для этих зарядов была получена зависимость $D(d)$. Было произведено термоциклирование зарядов до криогенных температур, после чего критический диаметр уменьшился до 7 и 9 мм, соответственно. Также существенно изменился график зависимости $D(d)$ – участок выхода на предельный диаметр существенно укоротился, что указывает на увеличение чувствительности. Такой же эффект наблюдался для высокоплотного заряда тэна, полученного методом термовакuumной возгонки [2]. Таким образом, изменяя структуру взрывчатого материала, можно изменять чувствительность заряда.

В настоящей работе проведено исследование влияния добавки к заряду тротила на детонацию полученной смеси, в качестве добавки использованы углеродные одностенные нанотрубки. Выбор способа модификации ВВ определяется уникальными свойствами нанотрубок, которые обладают высокими прочностью, проводимостью и теплопроводностью [3]. Ранее ВВ с добавлением аналогичных углеродных нанотрубок исследовано в работе [4]. Прессованный высокоплотный заряд гексогена детонировал со скоростью выше, чем для аналогичного заряда чистого гексогена. Процедура изготовления смеси ТНТ+0,5% нанотрубок аналогична описанной в работе [4]. В процессе конденсации взрывчатое вещество осаждается на нанотрубках, содержащихся в растворе. Полученный материал показан на рисунке 1. Интересной особенностью полученной субстанции является перемешивание на субмикронном уровне. Для заряда с плотностью $\approx 0,7$ г/см³ получена детонация со скоростью, близкой к предельной для данной плотности, что эквивалентно увеличению чувствительности.

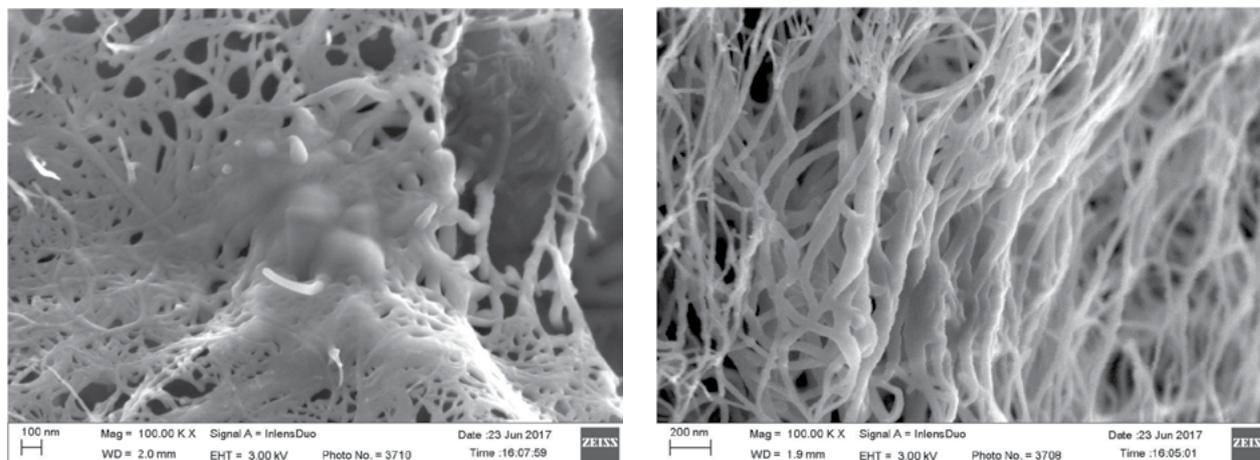


Рис. 1. Изображение осажденного на нанотрубках тротила под микроскопом

Литература

1. **Кравцов, В. В.** Влияние низкой температуры на параметры детонации литого тротила [Текст] / В. В. Кравцов, В. В. Сильвестров // Физика горения и взрыва. – 1979. – Т. 15, № 3. – С. 119–124.
2. **Мильченко, Д. В.** Наноструктурированные ВВ, полученные методом осаждения из газовой фазы. Особенности структуры и взрывчатых свойств [Текст] / Д. В. Мильченко, В. А. Губачёв, Л. А. Андреевских, С. А. Вахмистров, А. Л. Михайлов, и др. // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 96–101.
3. **Анищик, В. М.** Наноматериалы и Нанотехнологии [Текст] / В. М. Анищик, В. Е. Борисенко, С. А. Жданок, Н. К. Толочко, В. М. Федосюк. – Минск : Издательский центр БГУ, 2008. – 375 с.
4. **Ершов, А. П.** Детонация взрывчатого вещества, содержащего наноразмерные включения [Текст] / А. П. Ершов, Г. Р. Дашапилов, Д. И. Карпов, А. О. Кашкаров, Я. Л. Лукьянов и др. // Физика горения и взрыва. – 2020. – Т. 57, № 1. – С. 112–119.

STUDY OF THE EFFECT OF ADDING CARBON NANOTUBES ON THE SENSITIVITY OF A LOW-DENSITY TNT CHARGE

N. P. Satonkina^{1,2}, A. P. Ershov¹, A. O. Kashkarov¹, I. A. Rubtsov¹, A. A. Kuzminykh², S. S. Pudova², M. S. Terekhova²

¹Institute of Hydrodynamics, M. A. Lavrentiev SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Detonation physics knows that there is a relationship between the detonation velocity D and the charge diameter d at a fixed charge density. In this case, the section of the dependence $D(d)$ can be reduced, and the limiting diameter can be significantly reduced by changing the structure. Thus, in the work [1], charges of cast TNT with different manufacturing methods were studied, which resulted in the formation of coarse- and fine-grained structures, the critical diameter of the charges of which differed by ≈ 2 times (27.5 and 15 mm). For these charges, the dependence $D(d)$ was obtained. The charges were thermally cycled to cryogenic temperatures, after which the critical diameter decreased to 7 mm and 9 mm, respectively. The plot of the dependence $D(d)$ has also changed significantly - the section of reaching the limiting diameter has been significantly shortened, which indicates an increase in sensitivity. The same effect was observed for a high-density PETN charge obtained by thermal vacuum sublimation [2]. Thus, by changing the structure of the explosive material, it is possible to change the sensitivity of the charge. In the present work, we studied the effect of an additive to the TNT charge on the detonation of the resulting mixture; single-walled carbon nanotubes were used as an additive. The choice of the method for modifying explosives is determined by the unique properties of nanotubes, which have high strength, conductivity, and thermal conductivity [3]. Previ-

ously, explosives with the addition of similar carbon nanotubes were studied in the work [4]. The pressed high-density RDX charge detonated at a rate higher than for a similar charge of pure RDX. The procedure for preparing a mixture of TNT+0.5% nanotubes is similar to that described in the work [4]. During the condensation process, the explosive is deposited on the nanotubes contained in the solution. The resulting material is shown in Figure 1. An interesting feature of the resulting substance is mixing at the submicron level. For a charge with a density of $\approx 0.7 \text{ g/cm}^3$, detonation was obtained at a rate close to the limiting one for a given density, which is equivalent to an increase in sensitivity.

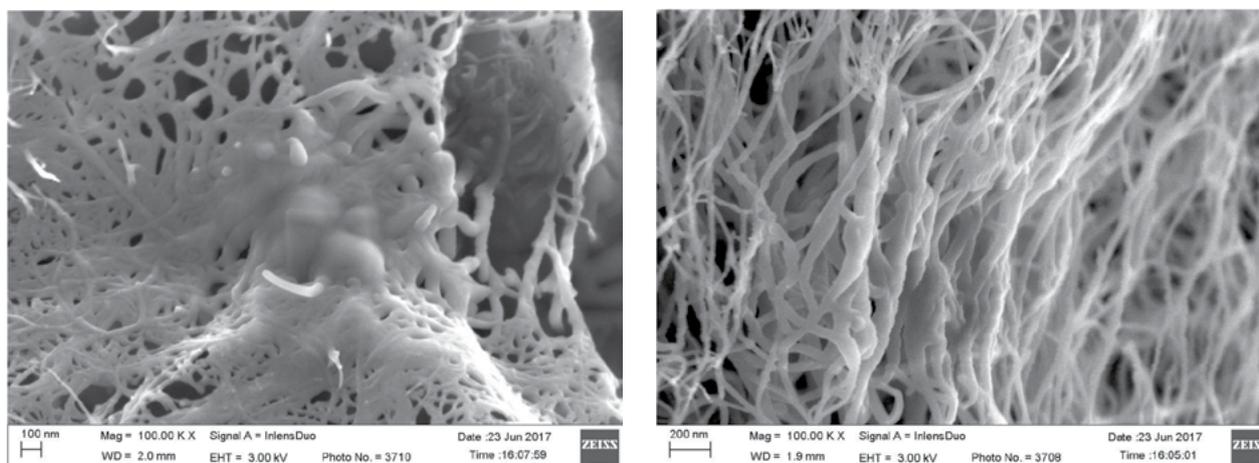


Fig. 1. Image of TNT deposited on nanotubes under a microscope

References

1. **Kravtsov, V. V.** Effect of low temperature on detonation parameters of cast trotyl [Text] / V. V. Kravtsov, V. V. Sil'vestrov // *Combustion, Explosives and Shock Waves*. – 1979. – Vol. 15. – P. 387–390.
2. **Mil'chenko, D. V.** Nanostructured explosives produced by vapordeposition: Structure and explosive properties [Text] / D. V. Mil'chenko, V. A. Gubachev, L. A. Andreevskikh, S.A. Vakhmistrov, A. L. Mikhailov et al. // *Combustion, Explosives and Shock Waves*. – 2015. – Vol. 51. – P. 80–85.
3. **Анищик, В. М.** Наноматериалы и Нанотехнологии [Text] / В. М. Анищик, В. Е. Борисенко, С. А. Жданок, Н. К. Толочко, В. М. Федосюк. – 2008. – Минск : Издательский центр БГУ. – 375 р.
4. **Ershov, A. P.** Detonation of an Explosive Containing Carbon Nanotubes [Text] / A. P. Ershov, G. R. Dashapilov, D. I. Karpov, A. O. Kashkarov, Ya. L. Lukyanov et al. // *Combustion, Explosives and Shock Waves*. – 2021. Vol. 57, No. 1. – P. 104–111.

2-27

МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА ПОЛИМОРФНОГО ПЕРЕХОДА β - α В 2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛЕ

*А. В. Станкевич^{1,2}, Н. А. Распутин², А. Х. Рудина¹, В. И. Филякова²,
Г. Л. Русинов², В. Н. Чарушин²*

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Основой плавких энергетических материалов, как правило, являются низкотемпературные вещества с температурой плавления ниже 100°C . С начала XXI века, в качестве легкоплавкого компонента смесевых энергетических материалов, нашел применение 2,4-динитроанизол (2,4-ДНА). Однако,

в области эксплуатационных температур в нем наблюдается, по крайней мере, один полиморфный переход [1, 2]: метастабильной при нормальных условиях β -формы [3] в квазистабильную α -форму [4].

В данной работе приведены исследования механизма и кинетики полиморфного перехода второго рода, протекающего в энергетическом материале 2,4-ДНА. Структурные изменения 2,4-ДНА зарегистрированы изотермическими методами порошковой терморентгенографии внутреннего стандарта от 290 до 350 К с шагом 10 К. Расчеты данных рентгеновской дифрактометрии выполнены методами полнопрофильного анализа с интегрированным в алгоритм циклом квантового моделирования структуры молекул. Кинетические параметры полиморфного перехода оценивались изоконверсионными методами на основе уравнения Аррениуса. Полученные уравнения кинетики полиморфного перехода позволили описать процессы, происходящие в свежизготовленном сверхчистом ДНА, а также произвести термодинамические расчеты для оценки P - T фазовых диаграмм смесей на основе 2,4-ДНА.

В результате для 2,4-ДНА определены точки фазовых равновесий и их вклад в наблюдаемые эффекты на термограммах. Показаны вероятные температуры плавления образцов в различных условиях. Установлен характер и период перехода β - α в 2,4-ДНА при различном начальном состоянии вещества в различных условиях хранения на складах. Изучен дальний и ближний порядок кристаллического состояния объектов исследования в области фазового перехода второго рода, определены параметры порядка [5].

Показано, что метастабильная β -модификация 2,4-ДНА становится квазистабильной при условиях хранения: давление 1 атм., температура ниже 15°C. В таких условиях 2,4-ДНА способен находиться в β -модификации более 30 лет, связано это с динамикой эксцентриситета тепловых эллипсоидов кислорода в нитрогруппах. При увеличении температуры хранения до 40–50°C и в зависимости от начального состояния вещества, его внутренней энергии, полиморфный переход протекает в замкнутом объеме в течении 2–3 часов, в открытом объеме от 2 до 4 недель. В зависимости от точки нахождения фазового равновесия, внутренней энергии образца в данный момент времени, при неизотермических условиях термического воздействия в образцах наблюдается плавление от 84 до 96°C. Кроме того, может наблюдаться полиморфный переход в любой точке от 20 до 82°C. Высказана гипотеза о вероятном наблюдении метастабильной при нормальных условиях эвтектики двух полиморфных модификаций 2,4-ДНА в случае одновременного соблюдения трех условий: не гомогенности смеси, внутренней диффузии и нерегулярности перехода. Полученные результаты могут быть использованы при построении физико-математического описания поведения конденсированного 2,4-ДНА при термическом воздействии, а также при оценке свойств смесевых композиций.

Литература

1. **van Alphen, J.** Dimorphism of 2,4-dinitroanisole [Text] // Chem. Ber. – 1930. – 63B. – P. 94–95.
2. **Denekamp, C.** Controlling the crystal morphology and polymorphism of 2,4-dinitroanisole [Text] / C. Denekamp et al. // Crystal Growth & Design. – 2018. – Vol. 18, No. 3. – P. 1350–1357.
3. **Xue, G.** Crystal structure of 2,4-dinitroanisole, C₇H₆N₂O₅ [Text] / G. Xue, C. Gong, H. Chen // Z. Krist. N. Cryst. Struct. – 2007. – Vol. 222. – P. 321–322.
4. **Nyburg, S. C.** Structures of 2,4-dinitroanisole and 2,6-dinitroanisole [Text] / S. C. Nyburg, C. H. Faerman, L. Prasad, D. Palleros, N. Nudelman // Acta Cryst. Sec. C. – 1987. – C43. – P. 686–689.
5. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. V, ч. 1. Статистическая физика. – 4-е изд. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1995.

MECHANISM AND KINETICS OF THE β - α POLYMORPHIC TRANSITION IN 2,4-DINITROANISOLE

*A. V. Stankevich^{1,2}, N. A. Rasputin², A. Kh. Rudina¹, V. I. Filyakova²,
G. L. Rusinov², V. N. Charushin²*

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

The basis of melt-castable energy materials, as a rule, are low-sensitive substances with a melting point below 100°C. Since the beginning of the XXI century, 2,4-dinitroanisole (2,4-DNAN) has been used as a low-melting component of mixed energy materials. However, in the field of operating temperatures, at least one polymorphic transition is observed in it [1, 2]: a metastable β -form under normal conditions [3] to a quasi-stable α -form [4].

This paper presents studies of the mechanism and kinetics of the polymorphic transition of the second kind occurring in the energy material of the 2,4-DNAN. Structural changes of the 2,4-DNAN were registered by isothermal methods of powder thermorentgenography of the internal standard from 290 to 350 K in increments of 10 K. Calculations of powder x-ray diffraction data are performed by methods of full-profile analysis with a cycle of quantum modeling of the structure of molecules integrated into the algorithm. Kinetic parameters of the polymorphic transition were estimated by isoconversion methods based on the Arrhenius equation. The obtained equations of the kinetics of the polymorphic transition made it possible to describe the processes occurring in the freshly prepared ultrapure DNAN, as well as to perform thermodynamic calculations to estimate the P - T phase diagrams of mixtures based on 2,4-DNAN.

As a result, the points of phase equilibria and their contribution to the observed effects on thermograms were determined for the 2,4-DNAN. The probable melting temperatures of the samples under various conditions are shown. The nature and period of the transition of β - α for 2,4-DNAN with different initial state of the substance in different storage conditions in warehouses has been established. The far and near order of the crystal state of the objects of study in the field of phase transition of the second kind has been studied, the order parameters have been determined [5].

It is shown that the metastable β -modification of 2,4-DNAN becomes quasi-stable under storage conditions: pressure of 1 atm., temperature below 15 °C. Under such conditions, 2,4-DNAN is capable of being in β -modification for more than 30 years, this is due to the dynamics of the eccentricity of thermal oxygen ellipsoids in nitro groups. When the storage temperature increases to 40–50°C and depending on the initial state of the substance, its internal energy, the polymorphic transition proceeds about 2–3 hours in a closed volume, in an open volume from 2 to 4 weeks. Depending on the point of finding the phase equilibrium, the internal energy of the sample at a given time, under non-isothermal conditions of thermal exposure, melting from 84 to 96°C is observed in the samples. In addition, a polymorphic transition can be observed at any point from 20 to 82°C. A hypothesis is proposed about the probable observation of metastable under normal conditions eutectic of two polymorphic modifications of 2,4-DNAN in the case of simultaneous compliance with three conditions: non-homogeneity of the mixture, internal diffusion and irregularity of the transition. The obtained results can be used in constructing a physical and mathematical description of the behavior of condensed 2,4-DNAN under thermal exposure, as well as in evaluating the properties of mixed compositions.

References

1. **van Alphen, J.** Dimorphism of 2,4-dinitroanisole [Text] // Chem. Ber. – 1930. – 63B. – P. 94–95.
2. **Denekamp, C.** Controlling the crystal morphology and polymorphism of 2,4-dinitroanisole [Text] / C. Denekamp et al. // Crystal Growth & Design. – 2018. – Vol. 18, No. 3. – P. 1350–1357.
3. **Xue, G.** Crystal structure of 2,4-dinitroanisole, C₇H₆N₂O₅ [Text] / G. Xue, C. Gong, H. Chen // Z. Krist. N. Cryst. Struct. – 2007. – Vol. 222. – P. 321–322.
4. **Nyburg, S. C.** Structures of 2,4-dinitroanisole and 2,6-dinitroanisole [Text] / S. C. Nyburg, C. H. Faerman, L. Prasad, D. Palleros, N. Nudelman // Acta Cryst. Sec. C. – 1987. – C43. – P. 686–689.
5. **Landau, L. D.** Theoretical Physics [Text] : in ten vol. Vol. V, part 1. Statistical physics. – Edition 4 / L. D. Landau, E. M. Lifshits. – M. : Nauka, 1995.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЗМА И КИНЕТИКИ ПЕРЕХОДНЫХ СОСТОЯНИЙ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А. В. Станкевич

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Химия быстропротекающих процессов привлекала исследователей многих творческих коллективов, из-за возможности оценки механизмов протекания химических реакций и последующего их регулирования. Для экспериментальной оценки механизмов и кинетики химических реакций в настоящее время применяется множество методик, имеющих ряд ограничений фундаментального характера [1, 2] и узкие диапазоны определения компонентов. Разумеется, каждая методика имеет ограничения, однако, наиболее широкий диапазон компонентного анализа предоставляет масс-спектрометрия и различные ее вариации, с возможностями одно и многостадийной ионизации и отдельным детектированием ионов [3, 4].

В данной работе показано создание методики определения химических реакций быстропротекающих процессов методами масс-спектрометрии. Проведена калибровка методики и показана целесообразность ее развития в виде тандемных и комбинированных решений. Полученная точность при определении компонентов достаточна для решения ряда инженерных задач кинетики быстропротекающих реакций. Реализован одно и двух стадийный процесс ионизации, времяпролетное хроматографирование и разделение ионов на квадруполях и циклотроне, что позволило более детально исследовать состав распада молекул с временным разрешением до 50 мкс. Оригинальные способы «заморозки» продуктов реакции позволили сохранить максимально репрезентативную часть молекулярных и ионных пучков продуктов разложения в различных режимах от медленного термического разложения до взрывчатого превращения.

Совмещение экспериментальных данных с термодинамическими расчетами [5] позволяет наиболее полно охарактеризовать механизмы химических реакций и классифицировать их.

Литература

1. **Манелис, Г. Б.** Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов [Текст] / Г. Б. Манелис, Г. М. Назин, Ю. И. Рубцов, В. А. Струнин. – М. : Наука, 1996. – С. 223.
2. **Nabiev, S. S.** Analysis of the products of natural decay of explosives by the methods of sub-terahertz and IR fourier spectroscopy [Text] / S. S. Nabiev et al. // J. Phys. Chem. – 2011. – Vol. 85, No. 8. – P. 521–1528.
3. **Корсунский, Б. Л.** Масс-спектрометрическое изучение газофазного распада ароматических нитросоединений [Текст] / Б. Л. Корсунский, Г. М. Назин, В. Р. Степанов, А. А. Федотов // Кинетика и катализ. – 1993. – Т. 34, № 5. – С. 775–777.
4. **Behrens, R.** Thermal decomposition of HMX and RDX: decomposition processes and mechanisms based on STMBMS and TOF velocity-spectra measurements [Text] / ed. S. N. Bulusu // Chemistry and Physics of Energetic Materials. – Sandia National Laboratories Combustion Research Facility Livermore, CA 94551–5000 USA. – P. 347–368.
5. **Гиббс, Дж. В.** Термодинамика. Статистическая механика [Текст]. – М. : Наука, 1982.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE CHEMISTRY AND KINETICS OF TRANSIENT STATES FOR FAST-FLOWING CHEMICAL PROCESSES

A. V. Stankevich

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics",
Snezhinsk, Russia

The chemistry of fast-flowing processes attracted researchers from many creative teams, because of the possibility of evaluating the mechanisms of chemical reactions and their subsequent regulation. To assess the mechanisms and kinetics of chemical reactions, many techniques are currently used that have a number of fundamental limitations [1, 2] and narrow ranges for determining components. Of course, each technique has limitations, however, the widest range of component analysis is provided by mass spectrometry and its variations, with the possibilities of single and multistage ionization and separate ion detection [3, 4].

This paper shows the creation of a technique for determining chemical reactions of fast-flowing processes by mass spectrometry methods. The calibration of the methodology was carried out and the expediency of its development in the form of tandem and combined solutions was shown. The obtained accuracy in determining the components is sufficient to solve a number of engineering problems of the kinetics of fast-flowing reactions. One- and two-stage ionization processes, time-of-flight chromatography and ion separation on quadrupoles and cyclotrons were implemented, which made it possible to study in more detail the composition of the decay of molecules with a time resolution of up to 50 microseconds. The original methods of "freezing" the reaction products made it possible to preserve the most representative part of the molecular and ion beams of decomposition products in various modes from slow thermal decomposition to explosive transformation.

Combining experimental data with thermodynamic calculations [5] makes it possible to characterize the mechanisms of chemical reactions and classify them most fully.

References

1. **Manelis, G. B.** Thermal decomposition and combustion of explosives and gunpowders [Text] / G. B. Manelis, G. M. Nazin, Yu. I. Rubtsov, V. A. Strunin. – M.: Nauka, 1996.
2. **Nabiev, S. S.** Analysis of the products of natural decay of explosives by the methods of sub-terahertz and IR fourier spectroscopy [Text] / S. S. Nabiev et al. // J. Phys. Chem. – 2011. – Vol. 85, No. 8. – P. 521–1528.
3. **Korsunsky, B. L.** Mass spectrometric study of gas-phase decomposition of aromatic nitro compounds [Text] / B. L. Korsunsky, G. M. Nazin, V. R. Stepanov, A. A. Fedotov // Kinetics and catalysis. – 1993. – Vol. 34, No. 5. – P. 775–777.
4. **Behrens, R.** Thermal decomposition of HMX and RDX: decomposition processes and mechanisms based on STMBMS and TOF velocity-spectra measurements [Text] / ed. S. N. Bulusu // Chemistry and Physics of Energetic Materials. – Sandia National Laboratories Combustion Research Facility Livermore, CA 94551–5000 USA. – P. 347–368.
5. **Gibbs, J. V.** Thermodynamics. Statistical mechanics [Text]. – M.: Nauka, 1982.

ТЕНЗОРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМОРФНЫХ МОДИФИКАЦИЙ 2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА

*А. В. Станкевич^{1,2}, Н. А. Распутин², А. Х. Рудина¹, В. И. Филякова²,
Г. Л. Русинов², В. Н. Чарушин²*

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Термическая деформация анизотропных органических молекулярных кристаллов представляет определенный интерес для оценки и анализа поведения сложных систем и композиционных материалов при термическом воздействии. Анизотропная термическая деформация энергетических материалов может быть представлена в тензорном виде [1], что значительно упрощает многопоточный анализ данных. Моноклинные α - [2] и β - [3] формы 2,4-динитроанизола (2,4-ДНА) в нормальных условиях являются анизотропными метастабильными фазами твердого вещества и представляют интерес как основа смесевых легкоплавких энергетических материалов.

В данной работе приведены исследования фазового перехода первого рода (плавление) и тензоров термической деформации для двух полиморфных форм 2,4-ДНА, рассчитанные по данным рентгеновской дифракции на порошках в диапазоне температур от 150 до 355 К для β - 2,4-ДНА и от 150 до 370 К для α - 2,4-ДНА. Структурные изменения энергетических материалов зарегистрированы методами терморентгенографии внутреннего стандарта с шагом 10 К и 2 К (вблизи точки плавления). Изучен дальний и ближний порядок кристаллического состояния объектов исследования в области фазового перехода первого рода. Расчеты данных рентгеновской дифрактометрии выполнены методами полнопрофильного анализа с интегрированным в алгоритм циклом квантового моделирования структуры молекул [4]. В качестве опорных методов полнопрофильного анализа использованы следующие методы: Паули [5], Ле-Бэля [6], Ритвельда (WPPD) [7] и WPPM [8]. В результате определены главные кристаллографические оси и характеристические поверхности тензора термической деформации, которые представлены численно, алгебраически и графически. Рассчитаны «истинные» коэффициенты термической деформации α - и β - 2,4-ДНА (расширение и сжатие) в анизотропном приближении. Проведена калибровка и сравнение с промежуточными точками, полученными методами монокристалльной рентгеновской дифрактометрии. Отмечен резкий рост коэффициента термической деформации β -формы 2,4-ДНА по направлению \bar{a} при охлаждении от 270 до 260 К, который указывает на снижение амплитуды эксцентриситета тепловых эллипсоидов кислорода нитрогрупп и переход материала из метастабильного в квазистабильное состояние.

Литература

1. **Никифоров, А. Е.** Введение в физику кристаллического состояния взрывчатых веществ [Текст] : учебное пособие / А. Е. Никифоров, В. Я. Базотов. – Казань : КГТУ, 2011. – 272 с.
2. **Nyburg, S. C.** Structures of 2,4-dinitroanisole and 2,6-dinitroanisole [Text] / S. C. Nyburg, C. H. Faerman, L. Prasad, D. Palleros, N. Nudelman // Acta Cryst. : Sec. C. – 1987. – Vol. 43. – P. 686–689.
3. **Takahashi, H.** Low temperature phase transition induced biaxial negative thermal expansion of 2,4-dinitroanisole [Text] / H. Takahashi, R. Tamura // CrystEngComm. – 2015. Vol. 17. Iss. 46. – P. 8888–8896.
4. **Патент 2566399 Российская Федерация, МПК G01N 23/20.** Способ определения структуры молекулярных кристаллов [Текст] / Станкевич А. В., Костицын О. В., Тайбинов Н. П. ; заявитель ФГУП РФЯЦ – ВНИИТФ ; приоритет от 17.04.2014 г. (РФ). – 13 с. : ил.
5. **Le Bail, A.** Structure determination of NaPbFe₂F₉ by X-ray powder diffraction [Text] // J. Solid State Chem. – 1989. – Vol. 83. – P. 267–271.
6. **Pawley, G. S.** Unit-cell refinement from powder diffraction scans [Text] // J. Appl. Crystallogr. – 1981. – Vol. 14. – P. 357–361.

7. **Pecharsky, V. K.** Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials [Text] / V. K. Pecharsky, P. Y. Zavalij. – Kluwer Academic Publishers, 2003. – 703 p.
8. **Scardi, P.** Whole powder pattern modeling [Text] / P. Scardi and M. Leoni // *Acta Cryst. : Sec. A* – 2002. – Vol. 58. – P. 190–200.

TENSORS OF THERMAL DEFORMATION FOR VARIOUS POLYMORPHIC MODIFICATIONS OF 2,4-DINITROANISOLE

*A. V. Stankevich^{1,2}, N. A. Rasputin², A. Kh. Rudina¹, V. I. Filyakova²,
G. L. Rusinov², V. N. Charushin²*

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Thermal deformation of anisotropic organic molecular crystals is of particular interest for evaluating and analyzing the behavior of complex systems and composite materials under thermal influence. Anisotropic thermal deformation for energetic materials can be represented in tensor form [1], which greatly simplifies multithreaded data analysis. Monoclinic α - [2] and β - [3] forms of 2,4-dinitroanisole (2,4-DNAN) under normal conditions are anisotropic metastable phases of a solid substance and are of interest as the basis of mixed fusible energetic materials.

This paper presents studies of the phase transition of the first kind (melting) and thermal deformation tensors for two polymorphic forms of 2,4-DNAN, calculated from x-ray diffraction data on powders in the temperature range from 150 to 355 K for β -2,4-DNAN and from 150 to 370 K for α -2,4-DNAN. Structural changes in energetic materials were recorded by thermorentgenography methods of the internal standard with steps of 10 K and 2 K (near the melting point). The far and near order of the crystal state of the objects of study in the field of phase transition of the first kind is studied. Calculations of powder x-ray diffraction data were performed by methods of full-profile analysis with a cycle of quantum modeling of the structure of molecules integrated into the algorithm [4]. The following methods were used as reference methods for full-profile analysis: Pauli [5], Le Bel [6], Rietveld (WPPD) [7] and WPPM [8]. As a result, the main crystallographic axes and characteristic surfaces of the thermal strain tensor are determined, which are represented numerically, algebraically and graphically. The “true” coefficients of thermal deformation of the α - and β -2,4-DNAN (expansion and compression) in the anisotropic approximation are calculated. Calibration and comparison with intermediate points obtained by single-crystal x-ray diffraction data were carried out. A sharp increase in the coefficient of thermal deformation of the β -form of the 2,4-DNAN in the a direction was noted when cooling from 270 to 260 K, which indicates a decrease in the amplitude of the eccentricity of thermal ellipsoids of oxygen of nitrogroups and the transition of the material from a metastable to a quasi-stable state.

References

1. **Nikiforov, A. E.** Introduction to the physics of the crystalline state of explosives: a textbook [Text] / A. E. Nikiforov, V. Ya. Bazotov. – Kazan : KSTU, 2011.
2. **Nyburg, S. C.** Structures of 2,4-dinitroanisole and 2,6-dinitroanisole [Text] / S. C. Nyburg, C. H. Faerman, L. Prasad, D. Palleros, N. Nudelman // *Acta Cryst. : Sec. C*. – 1987. – Vol. 43. – P. 686–689.
3. **Takahashi, H.** Low temperature phase transition induced biaxial negative thermal expansion of 2,4-dinitroanisole [Text] / H. Takahashi, R. Tamura // *CrystEngComm*. – 2015. Vol. 17. Iss. 46. – P. 8888–8896.
4. **Patent 2566399 Russian Federation, MPK G01N 23/20.** Method for determining the structure of molecular crystals [Text] / Stankevich A. V., Kostitsyn O. V., Taybinov N. P. ; applicant FSUE RFNC – VNIITF ; priority dated April 14, 2014 (RF). – 13 p. : ill.
5. **Le Bail, A.** Structure determination of NaPbFe₂F₉ by X-ray powder diffraction [Text] // *J. Solid State Chem.* – 1989. – Vol. 83. – P. 267–271.

6. **Pawley, G. S.** Unit-cell refinement from powder diffraction scans [Text] // J. Appl. Crystallogr. – 1981. – Vol. 14. – P. 357–361.
7. **Pecharsky, V. K.** Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials [Text] / V. K. Pecharsky, P. Y. Zavalij. – Kluwer Academic Publishers, 2003. – 703 p.
8. **Scardi, P.** Whole powder pattern modeling [Text] / P. Scardi and M. Leoni // Acta Cryst. : Sec. A – 2002. – Vol. 58. – P. 190–200.

2-30

ТЕНЗОРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ α -МОДИФИКАЦИИ СВЕРХЧИСТЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ 3-НИТРО-1,2,4-ТРИАЗОЛ-5-ОНА

А. В. Станкевич, Д. М. Гагаркин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Термостойкие энергетические вещества представляют определенный интерес при исследовании и анализе стабильности различных форм кристаллов и изучении межмолекулярных взаимодействий. Одним из термостойких веществ является 3-нитро-1,2,4-триазол-5-он (НТО), который известен, по меньшей мере, в двух кристаллических формах [1, 2], существующих при нормальных условиях. Как правило, за термическую стойкость веществ отвечает энергия внутримолекулярных и межмолекулярных связей, которая показывает устойчивость молекул и кристаллов к воздействию температуры. Локальная неоднородность также важна, но является частным случаем множества факторов. Температурное воздействие на вещество неизбежно приводит к ответной реакции в виде термической деформации, которую можно представить в тензорном виде, учитывающем анизотропию кристаллической структуры [2, 3].

В данной работе выполнена глубокая очистка молекулярных кристаллов энергоемкого соединения 3-нитро-1,2,4-триазол-5-она от примесей. Проведен рентгеноструктурный эксперимент для определения кристаллического состояния НТО при конечных температурах. Измерения термической деформации проводилось методом терморентгенографии внутреннего стандарта на порошкообразных образцах в диапазоне от 150 до 490 К, с шагом 10 К. Проведено совмещение некоторых экспериментальных точек с результатами монокристаллических измерений, и последующая калибровка кривой квазиизобарического расширения частиц порошка. В результате получены более точные оценки коэффициентов анизотропного термического расширения молекулярных кристаллов α -НТО, а также проведен предварительный анализ вклада дефектов кристаллической структуры и их смещение при термическом воздействии.

Литература

1. **Bolotina, N. B.**, Kirschbaum K., Pinkerton A. A. // Acta Crystallographica. Section B. – 2005. – Vol. 61. – P. 577.
2. **Bolotina, N. B.** Temperature dependence of thermal expansion tensors of energetic materials [Text] / N. B. Bolotina, A. A. Pinkerton // J. Appl. Cryst. – 2015. – Vol. 48.
3. **Никифоров, А. Е.** Введение в физику кристаллического состояния взрывчатых веществ: учебное пособие [Текст] / А. Е. Никифоров, В. Я. Базотов. – Казань : КГТУ, 2011.

THERMAL STRAIN TENSORS FOR α -MODIFICATION OF ULTRAPURE MOLECULAR CRYSTALS OF 3-NITRO-1,2,4-TRIAZOLE-5-ONE

A. V. Stankevich, D. M. Gagarkin

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics",
Snezhinsk, Russia

Heat-resistant energy substances are of particular interest in the study and analysis of the stability of various forms of crystals and the study of intermolecular interactions. One of the heat-resistant substances is 3-nitro-1,2,4-triazole-5-one (NTO) [1, 2], which is known in at least two crystalline forms that exist under normal conditions. As a rule, the energy of intramolecular and intermolecular bonds is responsible for the thermal stability of substances, which shows the resistance of molecules and crystals to temperature. Local heterogeneity is also important, but it is a special case of many factors. The temperature effect on the substance inevitably leads to a response in the form of thermal deformation, which can be represented in tensor form, taking into account the anisotropy of the crystal structure [2, 3].

In this work, a deep purification of molecular crystals of the energy-intensive compound 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one from impurities was performed. An powder x-ray diffraction experiment was carried out to determine the crystal state of NTO at finite temperatures. Measurements of thermal deformation were carried out by the method of thermorentgenography of the internal standard on powdered samples in the range from 150 to 490 K, in increments of 10 K. Some experimental points were combined with the results of single-crystal measurements, and the subsequent calibration of the curve of quasi-isobaric expansion of powder particles was carried out. As a result, more accurate estimates of the coefficients of anisotropic thermal expansion of α -NTO molecular crystals were obtained, as well as a preliminary analysis of the contribution of defects in the crystal structure and their displacement under thermal influence was carried out.

References

1. **Bolotina, N. B.**, Kirschbaum K., Pinkerton A. A. // Acta Crystallographica. Section B. – 2005. – Vol. 61. – P. 577.
2. **Bolotina, N. B.** Temperature dependence of thermal expansion tensors of energetic materials [Text] / N. B. Bolotina, A. A. Pinkerton // J. Appl. Cryst. – 2015. – Vol. 48.
3. **Nikiforov, A. E.** Introduction to the physics of the crystalline state of explosives: a textbook [Text] / A. E. Nikiforov, V. Ya. Bazotov. – Kazan : KSTU, 2011.

2-31

ТЕНЗОРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СВЕРХЧИСТЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ γ И δ 1,1-ДИАМИНО-2,2-ДИНИТРОЭТИЛЕНА

A. B. Станкевич

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Высокоэнергетическое вещество 1,1-диамино-2,2-динитроэтилен (ДАДНЭ, FOX-7) является термостойким органическим молекулярным кристаллом [1]. В настоящее время причина появления экзотермического эффекта, сопровождающегося образованием продукта, не имеющего при повторном термическом воздействии полиморфных переходов [2], вызывает некоторые дискуссии и требует дальнейшего исследования [3]. Поэтому, точное определение параметров кристаллического строения высокотемпературной фазы ДАДНЭ является актуальной задачей. В то же время, получение моно-

кристаллов данной фазы затруднительно из-за высокотемпературных режимов его синтеза, а анализ термической деформации всех полиморфных модификаций важен для понимания природы строения данного вещества. Анализ термической деформации α и β – форм ДАДНЭ нами проводился ранее и показан в работе [4].

В данной работе представлен анализ анизотропной термической деформации кристаллов γ и δ ДАДНЭ методами температурной порошковой рентгеновской дифрактометрии внутреннего стандарта. На начальном этапе были построены кристаллографические модели, максимально описывающие профиль экспериментальных картин дифракции рентгеновских лучей на кристаллах γ и δ ДАДНЭ. Определены параметры субструктуры кристаллов и их изотропные характеристики. Далее проводилось термическое воздействие на порошок δ ДАДНЭ до 150 К и уточнение модели кристалла при низких температурах. Затем определялись тензоры термической деформации, и динамика кристаллов до температуры начала разложения и высокоинтенсивной сублимации. В результате получены анизотропные коэффициенты термического расширения и уточненные характеристики кристаллических форм γ и δ ДАДНЭ.

Литература

1. **Latypov, N. V.** Synthesis and Reactions of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene [Text] / N. V. Latypov, J. Bergman, A. Langlet, U. Wellmar, U. Bemm // *Tetrahedron*. (patent US6312538). – 1998. – Vol. 54. – P. 11525–11536.
2. **Chemagina, I. V.** Investigation of Diaminodinitroethylene (DADNE) Thermal Decomposition [Text] / I. V. Chemagina, V. P. Filin, B. G. Loboiko, M. B. Kazakova, Y. A. Shaktorin et al. // *AIP Conf. Proc.* – 2005. – Vol. 849. – P. 174–178.
3. **Синдитский, В. П.** Особенности и загадки термического распада и горения 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена [Текст] / В. П. Синдитский, А. А. Куштаев, Н. В. Юдин, А. И. Левшенков // Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву, Суздаль. – 2022. – С. 88–89.
4. **Stankevich, A. V.** Thermal deformation and polymorphic transitions of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene in the temperature range from 145 to 475 K [Text] / A. V. Stankevich, N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn, A. Yu. Garmashev // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 1787. – P. 012006.

TENSORS OF THERMAL DEFORMATION OF ULTRAPURE MOLECULAR CRYSTALS γ AND δ 1,1-DIAMINO-2,2-DINITROETHYLENE

A. V. Stankevich

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

The high-energy substance 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (DADNE, FOX-7) is a heat-resistant organic molecular crystal [1]. Currently, the reason for the appearance of an exothermic effect, accompanied by the formation of a product that does not have polymorphic transitions during repeated thermal exposure [2], causes some discussion and requires further research [3]. Therefore, the exact determination of the parameters of the crystal structure of the high-temperature phase of DADNE is an urgent task. At the same time, obtaining single crystals of this phase is difficult due to the high-temperature modes of its synthesis, and the analysis of thermal deformation of all polymorphic modifications is important for understanding the nature of the structure of this substance. The analysis of thermal deformation of α and β –forms of DADNE was carried out by us earlier and is shown in [4].

This paper presents an analysis of anisotropic thermal deformation of γ and δ DADNE crystals by methods of internal standard temperature powder x-ray diffraction. At the initial stage, crystallographic models were constructed that maximally describe the profile of experimental x-ray diffraction patterns on γ and δ DADNE crystals. The parameters of the crystal substructure and their isotropic characteristics are determined. Next, the thermal effect on the powder was carried out up to 150 K and refinement of the crystal model at low tem-

peratures. Then the tensors of thermal deformation and the dynamics of crystals up to the temperature of the beginning of decomposition and high-intensity sublimation were determined. As a result, anisotropic coefficients of thermal expansion and refined characteristics of the crystal forms γ and δ DADNE were obtained.

References

1. **Latypov, N. V.** Synthesis and Reactions of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene [Text] / N. V. Latypov, J. Bergman, A. Langlet, U. Wellmar, U. Bemm // *Tetrahedron*. (patent US6312538). – 1998. – Vol. 54. – P. 11525–11536.
2. **Chemagina, I. V.** Investigation of Diaminodinitroethylene (DADNE) Thermal Decomposition [Text] / I. V. Chemagina, V. P. Filin, B. G. Loboiko, M. B. Kazakova, Y. A. Shaktorin et al. // *AIP Conf. Proc.* – 2005. – Vol. 849. – P. 174–178.
3. **Sinditskiy, V. P.** Features and mysteries of thermal decomposition and combustion 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene [Text] / V. P. Sinditskiy, A. A. Kushtaev, N. V. Yudin, A. I. Levshenkov // *Abstracts of the XVI All-Russian Symposium on Combustion and Explosion, Suzdal.* – 2022. – P. 88–89.
4. **Stankevich, A. V.** Thermal deformation and polymorphic transitions of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene in the temperature range from 145 to 475 K [Text] / A. V. Stankevich, N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn, A. Yu. Garmashev // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 1787. – P. 012006.

2-32

ХИМИЧЕСКАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ СМЕСЕЙ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВВ НА ОСНОВЕ ТЭНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. В. Станкевич, А. Р. Бакиров, И. В. Чемагина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Оценка химической совместимости компонентов смесевых энергетических веществ является необходимым знанием при ответе на вопросы безопасности веществ. При этом, основной упор делают на термическую стойкость и характер изменения протекания химических реакций: константы скорости реакций, энергия активации и интенсивность процесса. Светочувствительные материалы [1, 2], как правило, создаются на базе высокоэнергетического вещества с добавками, поглощающими и преобразующими энергию электромагнитного излучения. Однако, в большинстве случаев такие добавки являются не только оптическими, но и термическими, механическими сенсibilizаторами для энергетического материала, что сильно увеличивает чувствительность к внешним воздействиям.

В данной работе химическая совместимость оценивалась методами термического, спектрального и дифракционного анализа композиций светочувствительных ВВ на основе пентаэритриттетранитрата. В качестве добавок адсорбентов ЭМИ использовались углеродные нанотрубки, нанодисперсные металлы: алюминий, медь, никель, титан, а также оксиды молибдена и меди. Механизмы взаимодействия компонентов определялись изоконверсионными методами с параллельными масс-спектрометрическими измерениями.

В результате исследований показан характер увеличения скорости протекания разложения энергетических материалов при термическом воздействии и общее снижение термостойкости. С учетом известных законов теплопроводности [3], построены дифференциальные уравнения кинетики протекания химических реакций термического разложения светочувствительных энергетических материалов. На основе построенных уравнений проведена оценка вклада сенсibilizаторов в направлении протекания химических реакций и их роль в химических процессах.

Литература

1. **Зайцев, Б. Н.** Лазерное взрывание материалов [Текст]. – М. : «Onebook.ru», 2014.
2. **Таржанов, В. И.** Лазерное инициирование низкоплотных смесей тэна с металлическими добавками [Текст] / В. И. Таржанов, В. И. Сдобнов, А. Д. Зинченко, А. И. Погребов // ФГВ. – 2017. – Т. 53, № 2 – С. 118–125.
3. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. VII. Теория упругости: учеб. пособ. – Издание 4-е. испр. и доп. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1987.

CHEMICAL COMPATIBILITY AND MECHANISM OF INTERACTION OF COMPONENTS FOR MIXTURES OF PHOTSENSITIVE EXPLOSIVES BASED ON PETN UNDER THERMAL EXPOSURE

A. V. Stankevich, A. R. Bakirov, I. V. Chemagina

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

Evaluation of the chemical compatibility of the components of mixed energy substances is a necessary knowledge when answering questions about the safety of substances. At the same time, the main emphasis is placed on thermal stability and the nature of changes in the course of chemical reactions: reaction rate constants, activation energy and intensity of the process. Photosensitive materials [1, 2], as a rule, are created on the basis of a high-energy substance with additives that absorb and transform the energy of electromagnetic radiation. However, in most cases, such additives are not only optical, but also thermal, mechanical sensitizers for energetic materials, which greatly increases sensitivity to external influences.

In this work, chemical compatibility was evaluated by thermal, spectral and diffraction analysis of compositions of photosensitive explosives based on pentaerythritol tetranitrate. Carbon nanotubes, nanodisperse metals: aluminum, copper, nickel, titanium, as well as molybdenum and copper oxides were used as additives of EMR adsorbents. The mechanisms of interaction of the components were determined by isoconversion methods with parallel mass spectrometric measurements.

As a result of the research, the nature of the increase in the rate of decomposition of energy materials under thermal exposure and the overall decrease in heat resistance are shown. Taking into account the known laws of thermal conductivity [3], differential equations of the kinetics of chemical reactions of thermal decomposition for photosensitive energy materials are constructed. On the basis of the constructed equations, the contribution of sensitizers to the directions of chemical reactions and their role in chemical processes are estimated.

References

1. **Zaitsev, B. N.** Laser blasting of materials [Text]. – М. : “Onebook.ru”, 2014. – Vol. 1 – 656 p.
2. **Tarzhanov, V. I.** Laser initiation of low-density mixtures of heating elements with metal additives [Text] / V. I. Tarzhanov, V. I. Sdobnov, A. D. Zinchenko, A. I. Pogrebov // FGV. – 2017. – Vol. 53, No. 2. – P. 118–125.
3. **Landau, L. D.** Theoretical Physics [Text] : in ten vol. Vol. VII. Theory of elasticity: Textbook. – 4th edition. ispr. and add. / L. D. Landau, E. M. Lifshits. – М.: Nauka, 1987.

2-33

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФТОРИДА КОБАЛЬТА (III) С УГЛЕРОДОМ

А. В. Станкевич, А. Х. Рудина, И. В. Чемагина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Химические взаимодействия окислителя и горючего компонента смеси представляют определенный интерес в различных областях материаловедения и технической физике, как в случаях образования конденсированных продуктов реакций – горение металлов, образование интерметаллидов и других более сложных по составу химических соединений в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, так и в случае формирования газообразных продуктов, позволяющих создавать, например, активные фторирующие компоненты для процессов травления подложек в микроэлектронике, химической промышленности, а также импульсные химические лазеры.

В данной работе проведены исследования механизмов образования фторидов и оксифторидов углерода в реакциях взаимодействия фторида кобальта (III) с различными формами углерода. Исследования проводились оригинальными методиками, основанными на измерениях методами масс-спектрометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света при различных термических воздействиях. Установлены концентрационные пределы взаимодействия компонентов для максимального образования целевых продуктов. Механизмы реакций записаны в виде схем физико-химических процессов. Получены коэффициенты дифференциальных уравнений кинетики процессов химического взаимодействия компонентов смесей различной компоновки.

KINETICS AND MECHANISM OF CHEMICAL REACTIONS OF COBALT (III) FLUORIDE INTERACTION WITH CARBON

A. V. Stankevich, A. Kh. Rudina, I. V. Chemagina

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

The chemical interactions of the oxidizer and the combustible component of the mixture are of particular interest in various fields of materials science and technical physics, as in cases of the formation of condensed reaction products – combustion metals, the formation of intermetallides and other chemical compounds more complex in composition in the processes of self-propagating high-temperature synthesis, and in the case of the formation of gaseous products, allowing the creation, for example, active fluorinating components for etching substrates in microelectronics, chemical industry, as well as pulsed chemical lasers.

In this paper, the mechanisms of formation of fluorides and carbon oxifluorides in the reactions of cobalt (III) fluoride with various forms of carbon have been studied. The research was carried out using original methods based on measurements by mass spectrometry and Raman spectroscopy under various thermal influences. Concentration limits of interaction of components for maximum formation of target products are established. The reaction mechanisms are recorded in the form of schemes of physico-chemical processes. Coefficients of differential equations of kinetics of processes of chemical interaction of components of mixtures of various layouts are obtained.

КИНЕТИКА СУБЛИМАЦИИ СВЕРХЧИСТЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ЭНЕРГОЕМКИХ СОЕДИНЕНИЙ

А. В. Станкевич

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Для большинства органических веществ характерно протекание сублимационных процессов, как с поверхности, так и в массе [1]. Очевидно, что учет скорости процессов перехода вещества из твердого в газообразное состояние необходим при анализе изменений свойств вещества с течением времени и оценке гарантийных сроков хранения. Параллельно с процессами сублимации могут протекать процессы медленной деструкции материалов как в газовой фазе, так и на поверхности раздела фаз.

С точки зрения классической термодинамики сублимацию вещества на энергетической шкале можно представить, как разность энергии образования твердого тела и молекул вещества в газовой фазе. Известно множество методов, позволяющих оценить энергию сублимационного процесса как из первопринципных квантово-химических представлений [2], так и экспериментально на основе физико-химических методов анализа. Причем, теоретические методы, как правило, оценивают идеализированные процессы образования сверхчистых фаз, в то время, как экспериментальные данные содержат в себе информацию о совокупности процессов, протекающих одновременно. Провести идеальный эксперимент, едва ли возможно, так как множество физических параметров системы меняется с течением времени, иногда довольно существенно. Учет вклада каждого из процессов в общую картину важен при оценке в целом. Поэтому отметим важность анализа различными экспериментальными и теоретическими методами, по возможности, учитывающих максимальное количество переменных.

В данной работе экспериментальными методами определены параметры сублимации сверхчистых молекулярных кристаллов энергетических соединений. В качестве методов измерения использовались прямая и инвертированная гравиметрия, а также масс-спектрометрия. Полученные данные обрабатывались в едином цикле, проводился учет параметров микроразложения и сублимации. В результате получены значения энергии сублимации и активации, константы скорости сублимации при различных температурах и давлении.

Литература

1. **Лебедев, Ю. А.** Термохимия парообразования органических веществ [Текст] / Ю. А. Лебедев, Е. А. Мирошниченко. – М. : Наука. – 1981. – 216 с.
2. **Сунцова, М. А.** Прогнозирование энтальпий образования новых азотсодержащих высокоэнергетических соединений на основе квантово-химических расчетов [Текст] // Дис. канд. хим. наук. – М. : МГУ, 2018.

KINETICS OF SUBLIMATION FOR ULTRAPURE MOLECULAR CRYSTALS OF ENERGETIC COMPOUNDS

A. V. Stankevich

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

Most organic substances are prone to sublimation processes both from the surface and in the mass [1]. It is obvious that taking into account the speed of the transition of a substance from a solid to a gaseous state is necessary when analyzing changes in the properties of a substance over time and evaluating the warranty shelf life. In parallel with the sublimation processes, the processes of slow destruction of materials can occur both in the gas phase and on the interface of the phases.

From the point of view of classical thermodynamics, the sublimation of a substance on the energy scale can be represented as the difference in the energy of formation of a solid and molecules of a substance in the gas phase. There are many methods that allow us to estimate the energy of the sublimation process both from the first-principle quantum chemical representations [2] and experimentally based on physico-chemical analysis methods. Moreover, theoretical methods, as a rule, evaluate idealized processes of formation of ultrapure phases, while experimental data contain information about the totality of processes occurring simultaneously. It is hardly possible to conduct an ideal experiment, since many physical parameters of the system change over time, sometimes quite significantly. Taking into account the contribution of each of the processes to the overall picture is important when evaluating as a whole. Therefore, we note the importance of analysis by various experimental and theoretical methods, if possible, taking into account the maximum number of variables.

In this paper, the parameters of sublimation of ultrapure molecular crystals of energetic compounds are determined by experimental methods. Direct and inverted gravimetry, as well as mass spectrometry were used as measurement methods. The obtained data were processed in a single cycle, the parameters of microdecomposition and sublimation were taken into account. As a result, the values of the sublimation and activation energy, the sublimation rate constants at different temperatures and pressures are obtained.

References

1. **Lebedev, Yu. A.** Thermochemistry of vaporization of organic substances [Text] / Yu. A. Lebedev, E. A. Miroshnichenko. – М. : Nauka, 1981.
2. **Suntsova, M. A.** Prediction of enthalpy of formation of new nitrogen-containing high-energy compounds based on quantum chemical calculations [Text] // dis. Ph. D. of Chemical Sciences). – М. : MSU, 2018.

2-35

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОАКСИАЛЬНО-СЛОИСТЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Станкевич, Д. В. Петров

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Численное моделирование газодинамических процессов в изделиях сложной геометрии, состоящих из различных материалов, позволяет составлять простые инженерные схемы для дальнейшего анализа функциональных показателей систем и газодинамических процессов. Например, при создании нагружающих устройств в физике высоких плотностей энергии, анализе активности частиц и компонентов химических процессов при высоких давлениях и температурах близких к 1–1,5 эВ. Однако, для выполнения таких численных экспериментов необходим набор уравнений состояния, кинетики реагирующих компонентов, упруго-пластики каждого материала, входящего в систему [1, 2].

В данной работе рассмотрена системная задача изучения процессов газовой динамики при взрывном турбулентном течении, образованном продуктами превращения химически реагирующих смесей, расположенных в различных частях слоистых цилиндрических образцов: коаксиальные и планальные слои. Исследование проводилось расчетными методами конечных элементов по сеткам Вороного–Делоне в постановках Эйлера и Лагранжа. Динамическая коррекция сеток выполнялась по дискретным алгоритмам эрозии. Уравнения для моделирования процессов были взяты из известной литературы и баз данных, а также построены на основе маломасштабных экспериментов физической химии. С учетом химической кинетики показан характер течения при формировании тройных (маховских) отражений в различных частях брикетов из энергетических материалов.

В результате моделирования составлены простые инженерные схемы для расчета геометрии коаксиально-слоистых изделий из ВВ различного типа.

Литература

1. **Mader, C. L.** Numerical Modeling of explosives and propellants [Text]. – NW. : Taylor&Francis, 2008.
2. Фундаментальные проблемы моделирования турбулентных и двухфазных течений [Текст]. Т. 2: Численное моделирование. – М. : Наука, 2010.

NUMERICAL SIMULATION FOR GAS-DYNAMIC PROCESSES IN COAXIALLY-LAYERED COMBINED PRODUCTS MADE OF VARIOUS TYPES OF ENERGETIC MATERIALS

A. V. Stankevich, D. V. Petrov

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

Numerical modeling of gas-dynamic processes in products of complex geometry consisting of various materials makes it possible to make simple engineering schemes for further analysis of functional indicators of systems and gas-dynamic processes. For example, when creating loading devices in physics of high energy densities, analyzing the activity of particles and components of chemical processes at high pressures and temperatures close to 1–1.5 eV. However, to perform such numerical experiments, a set of equations of state, kinetics of reacting components, and elasticities of each material included in the system is required [1, 2].

In this paper, the systemic problem of studying the processes of gas dynamics in an explosive turbulent flow formed by the products of the transformation of chemically reacting mixtures located in various parts of layered cylindrical samples: coaxial and planal layers is considered. The study was carried out by finite element calculation methods on Voronoi–Delaunay grids in the Euler and Lagrange formulations. Dynamic grid correction was performed using discrete erosion algorithms. The equations for modeling processes were taken from well-known literature and databases, and also constructed on the basis of small-scale experiments in physical chemistry. Taking into account the chemical kinetics, the nature of the flow during the formation of triple (Mach) reflections in various parts of briquettes made of energy materials is shown.

As a result of modeling, simple engineering schemes have been compiled for calculating the geometry of coaxial-layered explosive products of various types.

References

1. **Mader, C. L.** Numerical Modeling of explosives and propellants [Text]. – NW.: Taylor&Francis, 2008.
2. Fundamental problems of modeling turbulent and two-phase flows [Text]. Vol. 2: Numerical modeling. – М. : Nauka, 2010.

2-36

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ НИТРИДА УГЛЕРОДА В ВОЛНЕ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ

А. В. Станкевич^{1,2}, С. Г. Толщина², А. В. Коротина², Г. Л. Русинов²

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Путь к нитриду углерода [1] и созданию масштабных методов синтеза оказался весьма интересным, как с химической и физической точки зрения, так и с точки зрения способов получения [2]. На

сегодняшний день известно большое количество различных модификаций нитрида углерода сформированного на основе гептазиновых или триазиновых фрагментов [2, 3].

В данной работе предпринята попытка систематизировать данные о механизмах образования различных форм нитрида углерода в волне горения и детонации с упором на механизмы термического разложения исходных компонентов. Общепринятый подход формирования нитрида углерода структуры графита ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) посредством пиролиза меламина широко используется в практике изготовления фотокатализаторов [2–5] различного химического состава и базируется на реакции отщепления молекулы аммиака от триазиновых циклов с последующей полимеризацией. Однако, это не единственный путь формирования нитрида углерода, существует термобарический метод с перегруппировкой sp^2 - sp^3 межатомарных связей углерода [6], а также метод конденсации из газовой фазы путем присоединения молекул дициана [7]. Подобный механизм может быть реализован в результате протекания химических реакций в форме горения и детонации с последовательным разложением вещества, сжатием газовой фазы и поликонденсацией нитрида углерода в графитовой или алмазной форме. Причем, на предполагаемой фазовой диаграмме, образование алмазного нитрида углерода возможно при давлениях свыше 55 ГПа.

Показаны возможные пути и механизмы образования различных форм нитрида углерода в волне горения и детонации при реакциях в полиазотсодержащих соединениях.

Литература

1. **Корсунский, Б. Л.** На пути к нитриду углерода [Текст] / Б. Л. Корсунский, В. И. Пепекин // Успехи химии. – 1997. – Т. 66, № 11. – С. 1003–1014.
2. **Lotsch, B. V.** From Triazines to Heptazines: Novel Nonmetal Tricyanomelaminates as Precursors for Graphitic Carbon Nitride Materials [Text] / B. V. Lotsch and W. Schnick // Chem. Mater. – 2006. – Vol. 18. – P. 1891–1900.
3. **Thomas, A.** Graphitic carbon nitride materials: variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts [Text] / A. Thomas, A. Fischer, F. Goettmann, M. Antonietti, J.-O. Müller et al. // Journal of Materials Chemistry. – 2008. – Vol. 18, No. 41. – P. 4893–4908.
4. **Matsumoto, S.** On the validity of the formation of crystalline carbon nitrides, C_3N_4 [Text] / S. Matsumoto, E.-Q. Xie, F. Izumi // Diamond and Related Materials. – 1999. – Vol. 8. – P. 1175–1182.
5. **Axet, M. R.** Chapter Two – Surface coordination chemistry on graphene and two-dimensional carbon materials for well-defined single atom supported catalysts [Text] / M. R. Axet, J. Durand, M. Gouygou, P. Serp // Advances in Organometallic Chemistry. – Vol. 71. – P. 53–174.
6. **Кравченко, О. В.** Термобарический синтез объемных образцов кристаллического нитрида углерода [Текст] / О. В. Кравченко, К. П. Бурдина, С. А. Трашин, Ю. Я. Кузяков, В. Н. Леднев и др. // Вестн. моск. ун-та. Сер. 2: химия. – 2006. – Т. 47, № 4. – С. 266–268.
7. **Stankevich, A. V.** Mechanism, Kinetics and Thermodynamics of Decomposition for High Energy Derivatives of [1,2,4]Triazolo[4,3-b][1,2,4,5]tetrazine [Text] / A. V. Stankevich, S. G. Tolshchina, A. V. Korotina, G. L. Rusinov, I. V. Chemagina, V. N. Charushin // Molecules. – 2022. – Vol. 27. – P. 6966.

MECHANISM OF FORMATION OF VARIOUS FORMS OF CARBON NITRIDE IN THE WAVE OF COMBUSTION AND DETONATION

A. V. Stankevich^{1,2}, S. G. Tolshchina², A. V. Korotina², G. L. Rusinov²

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

The path to carbon nitride [1] and the creation of large-scale synthesis methods turned out to be very interesting, both from a chemical and physical point of view, and from the point of view of production methods [2]. To date, a large number of different modifications of carbon nitride formed on the basis of heptazine or triazine fragments are known [3].

In this paper, an attempt is made to systematize data on the mechanisms of formation of various forms of carbon nitride in the combustion and detonation wave, with an emphasis on the mechanisms of thermal decomposition of the initial components. The generally accepted approach to the formation of carbon nitride of graphite structure ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) by pyrolysis of melamine is widely used in the practice of manufacturing photo catalysts [2–5] of various chemical compositions and is based on the reaction of cleavage of ammonia molecules from triazine cycles with subsequent polymerization. However, this is not the only way to form carbon nitride, there is a thermobaric method with the rearrangement of sp^2 - sp^3 interatomic carbon bonds [6], as well as a method of condensation from the gas phase by attaching dicyan molecules [7]. Such a mechanism can be realized as a result of chemical reactions in the form of combustion and detonation with sequential decomposition of the substance, compression of the gas phase and polycondensation of carbon nitride in graphite or diamond form. Moreover, in the assumed phase diagram, the formation of diamond carbon nitride is possible at pressures above 55 GPa.

Possible ways and mechanisms of formation of various forms of carbon nitride in the wave of combustion and detonation during reactions in polynitrogen-containing compounds are shown.

References

1. **Korsunsky, B. L.** On the way to carbon nitride [Text] / B. L. Korsunsky, V. I. Pepekin // *Successes of Chemistry*. – 1997. – Vol. 66, No. 11. – P. 1003–1014.
2. **Lotsch, B. V.** From Triazines to Heptazines: Novel Nonmetal Tricyanomelaminates as Precursors for Graphitic Carbon Nitride Materials [Text] / B. V. Lotsch and W. Schnick // *Chem. Mater.* – 2006. – Vol. 18. – P. 1891–1900.
3. **Thomas, A.** Graphitic carbon nitride materials: variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts [Text] / A. Thomas, A. Fischer, F. Goettmann, M. Antonietti, J.-O. Müller, et al. // *Journal of Materials Chemistry*. – 2008. – Vol. 18, No. 41. – P. 4893–4908.
4. **Matsumoto, S.** On the validity of the formation of crystalline carbon nitrides, C_3N_4 [Text] / S. Matsumoto, E.-Q. Xie, F. Izumi // *Diamond and Related Materials*. – 1999. – Vol. 8. – P. 1175–1182.
5. **Axet, M. R.** Chapter Two – Surface coordination chemistry on graphene and two-dimensional carbon materials for well-defined single atom supported catalysts [Text] / M. R. Axet, J. Durand, M. Gouygou, P. Serp // *Advances in Organometallic Chemistry*. – Vol. 71. – P. 53–174.
6. **Kravchenko, O. V.** Thermobaric synthesis of bulk samples of crystalline carbon nitride [Text] / O. V. Kravchenko, K. P. Burdina, S. A. Trashin, Yu. Ya. Kuzyakov, V. N. Lednev et al. // *Vestn. Moscow. un-ta. Ser. 2: chemistry*. – 2006. – Vol. 47, No. 4. – P. 266–268.
7. **Stankevich, A. V.** Mechanism, Kinetics and Thermodynamics of Decomposition for High Energy Derivatives of [1,2,4]Triazolo[4,3-b][1,2,4,5]tetrazine [Text] / A. V. Stankevich, S. G. Tolshchina, A. V. Korotina, G. L. Rusinov, I. V. Chemagina, V. N. Charushin // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27. – P. 6966.

2-37

ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДУКТОВ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ РЕАКЦИЙ ФТОРИРОВАНИЯ БОРА, КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДА

А. В. Станкевич

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Химические реакции фторирования бора, кремния и углерода используются в различных областях науки и техники, например, при травлении кремниевых подложек сильными кислотами Льюиса или генерации импульсов лазерного излучения. Фундаментальные свойства бора – сильного восстановителя и фтора, – сильнейшего окислителя, определяют кинетику их взаимодействия, и характеризует реакции, как быстропотекающие [1]. Химия быстропотекающих процессов играет определяющую

роль в фундаментальных вопросах изучения механизмов химических реакций в условиях высокого давления и температуры. Химическая активность компонентов реакций, а также их устойчивость, оценивается по термодинамическим потенциалам, полученным при решении задач классической термодинамики, молекулярной динамики и квантовой химии.

В данной работе рассмотрены вопросы устойчивости продуктов взаимодействия фтора с углеродом, кремнием и бором в условиях воздушной атмосферы, в вакууме и аргоне. Оценка устойчивости выполнялась методами классической термодинамики [2] на основе известных баз данных свойств продуктов реакций [3, 4]. В результате были получены изотермы и изобары процессов взаимодействия исследуемых компонентов, состав продуктов реакций при различных давлениях и температурах, проведена оценка предельных скоростей звука в продуктах реакций и теплота реакций. Построены диаграммы Гиббса–Розебома для двухкомпонентных смесей. При анализе диаграмм выявлены наиболее устойчивые оксифториды и фториды бора, кремния и углерода.

Литература

1. Сарнер, С. Химия ракетных топлив [Текст]. – М. : Мир, 1969. – 488 с.
2. Сиярев, Г. Б. Полные термодинамические функции и использование их при расчете равновесных состояний сложных термодинамических систем [Текст] // Изв. Вузов. трансп. и энергетич. машиностр. – 1966. – № 2.
3. NIST-JANAF Thermochemical Tables 2 [Text] // Journal of Physical and Chemical Reference Data Monographs.
4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания [Текст] : справочник в 5 т. Т. 1 / Под ред. В. П. Глушко. – М. : ВИНТИ АН СССР, 1971.

ISSUES OF STABILITY OF PRODUCTS FOR FAST-FLOWING BORON, SILICON AND CARBON FLUORINATION REACTIONS

A. V. Stankevich

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

Chemical reactions of boron, silicon and carbon fluorination are used in various fields of science and technology, for example, when etching silicon substrates with activity Lewis acids or generating laser radiation pulses. The fundamental properties of boron, a strong reducing agent and fluorine, the strongest oxidizer, determine the kinetics of their interaction, and characterizes the reactions as fast-flowing [1]. The chemistry of fast-flowing processes plays a decisive role in the fundamental issues of studying the mechanisms of chemical reactions under conditions of high pressure and temperature. The chemical activity of the reaction components, as well as their stability, is estimated by thermodynamic potentials obtained in solving problems of classical thermodynamics, molecular dynamics and quantum chemistry.

In this paper, the issues of stability of products of interaction of fluorine with carbon, silicon and boron in the conditions of an air atmosphere, in vacuum and argon are considered. Stability assessment was carried out by methods of classical thermodynamics [2] on the basis of known databases of properties of reaction products [3, 4]. As a result, isotherms and isobars of the interaction processes of the studied components, the composition of reaction products at various pressures and temperatures were obtained, the limiting sound velocities in reaction products and the heat of reactions were evaluated. Gibbs–Rosebohm diagrams for two-component mixtures are constructed. The analysis of the diagrams revealed the most stable oxifluorides and fluorides of boron, silicon and carbon.

References

1. Sarner, S. Chemistry of rocket fuels [Text]. – M. : Mir, 1969.
2. Sinyarev, G. B. Complete thermodynamic functions and their use in the calculation of equilibrium states of complex thermodynamic systems [Text] // Izv. Vuzov. transp. and energetic. mashinostr. – 1966. – No. 2.

3. NIST-JANAF Thermochemical Tables 2 [Text] // Journal of Physical and Chemical Reference Data Monographs.
4. Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products [Text] : handbook in 5 volumes. Vol. 1 / Edited by V. P. Glushko. – М. : VINITI of the USSR Academy of Sciences, 1971.

2-38

КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ АЛЮМИНИЯ

А. В. Станкевич¹, М. А. Уймин², А. Е. Ермаков², И. В. Чемагина², С. И. Новиков²

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт физики металлов, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Процесс механической активации в шаровых мельницах в большинстве случаев сопровождается значительными изменениями структуры и незначительными изменениями химического состава. Наряду с процессами аморфизации [1, 2] протекают заметные изменения размеров частиц и кристаллитов [2]. Кроме того, меняется термическая и химическая стабильность, а способность к окислению может увеличиваться. В результате указанные процессы и структурное состояние твердого тела влияют на свойства конечного продукта.

В данной работе проведены исследования механизмов и кинетики процессов окисления интерметаллидов алюминия, полученных механической обработкой в шаровых вибромельницах. Получены значения скоростей реакций для интерметаллидов алюминия, содержащих Ва, La, Pr, Y, Sm, Се. Отмечено снижение термической стойкости и энергии активации на 10–30%, увеличение константы скорости реакции в 3 раза и интенсивности взаимодействующих частиц, количества актов взаимодействия частиц в единицу времени, на 4 порядка, при сравнимых температурах для исходных и обработанных продуктов.

В результате получены энергетические характеристики процесса механической активации интерметаллидов алюминия: удельная энергия и коэффициент передачи энергии шаров материалу в шаровых вибрационных мельницах, и выполнена оценка влияния различных режимов механической активации на величину запасенной энергии в интерметаллидах алюминия.

Литература

1. Разумов, И. К. Неравновесные фазовые превращения в сплавах при интенсивной пластической деформации [Текст] / И. К. Разумов, А. Е. Ермаков, Ю. Н. Горностырев, Б. Б. Страумал // УФН. – 2020. – Т. 190, № 8. – С. 785–810 (Phys. Usp. – 2020. – Vol. 63, No. 8. – P. 733–757).
2. Станкевич, А. В. Структурные превращения интерметаллидов алюминия при их механоактивации в шаровых вибромельницах [Текст] / А. В. Станкевич, М. А. Уймин, А. Е. Ермаков, С. И. Новиков, Д. И. Давыдов, В. С. Гавико // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XV Международной конференции 27 сентября – 1 октября 2021. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2021. – С. 71.

KINETICS OF OXIDATION OF MECHANICALLY ACTIVATED ALUMINUM INTERMETALLIDES

A. V. Stankevich¹, M. A. Uymin², A. E. Ermakov², I. V. Chemagina², S. I. Novikov²

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

²Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

The process of mechanical activation in ball mills in most cases is accompanied by significant changes in structure and minor changes in chemical composition. Along with the processes of amorphization [1, 2], there are noticeable changes in the sizes of particles and crystallites [2]. In addition, the thermal and chemical stability changes, and the ability to oxidize may increase. As a result, these processes and the structural state of the solid affect the properties of the final product.

In this paper, the mechanisms and kinetics of the oxidation processes of aluminum intermetallides obtained by mechanical processing in ball vibrating mills are investigated. The values of reaction rates for aluminum intermetallides containing Ba, La, Pr, Y, Sm, Ce were obtained. A decrease in thermal resistance and activation energy by 10–30% was noted, an increase in the reaction rate constant by 3 times and the intensity of interacting particles by 4 orders of magnitude, at comparable temperatures for raw and processed products.

As a result, the energy characteristics of the process of mechanical activation of aluminum intermetallides were obtained: the specific energy and the coefficient of energy transfer of balls to the material in ball vibration mills, and the influence of various modes of mechanical activation on the amount of stored energy in aluminum intermetallides was evaluated.

References

1. **Razumov, I. K.** Nonequilibrium phase transformations in alloys under intense plastic deformation [Text] / I. K. Razumov, A. E. Ermakov, Yu. N. Gornostyrev, B. B. Straumal // UFN. – 2020. – Vol. 190, No. 8. – P. 785–810 (Phys. Usp. – 2020. – Vol. 63, No. 8. – P. 733–757).
2. **Stankevich, A. V.** Structural transformations of aluminum intermetallides during their mechanical activation in ball vibrating mills [Text] / M. A. Uymin, A. E. Ermakov, S. I. Novikov, D. I. Davydov, V. S. Gaviko // Zababakhinsky scientific readings: collection of materials of the XV International Conference September 27 – October 1, 2021. – Snezhinsk : RFNC – VNIITF, 2021. – P. 71.

2-39

СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛЕЙ 3-НИТРО-4,5-ДИГИДРО-1,2,4-ТРИАЗОЛ-5-ОНА

Д. С. Ячевский¹, А. В. Станкевич^{1,2}, Г. Л. Русинов¹, И. В. Чемагина², В. Н. Чарушин¹

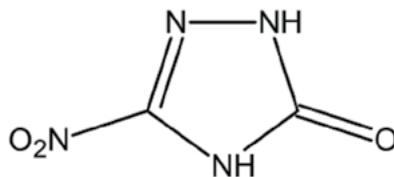
¹Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

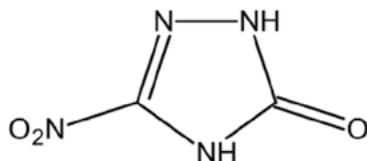
Повышение безопасности энергетических соединений с сохранением их взрывчатых свойств является первостепенной задачей при синтезе молекул и молекулярных кристаллов, в том числе сокристаллов и солей. Один из путей увеличения стабильности, с возможным, увеличением теплоты взрывчатого превращения энергетических материалов является создание сокристаллов или ион-молекулярных комплексов, содержащих в объеме элементарной ячейки кристаллического твердого тела две и более молекулы.

Для синтеза термически стабильных ион-молекулярных сокристаллов (солей) в данной работе в качестве исходного соединения использовалось термостойкое соединение 3-нитро-4,5-дигидро-1,2,4-триазол-5-он (НТО). Соли (1–3) [1–3] были получены взаимодействием НТО с соответствующими аминами в метаноле (в случае гидрохлорида гидроксилamina – в присутствии эквивалента КОН).

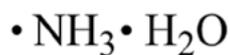
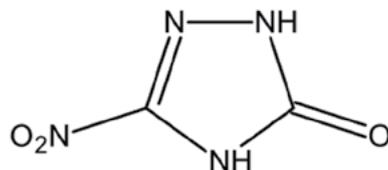
3-нитро-5-оксо-4,5-дигидро-1,2,4-триазолид гидразиния (1)



3-нитро-5-оксо-4,5-дигидро-1,2,4-триазолид гидроксиламмония (2)



3-нитро-5-оксо-4,5-дигидро-1,2,4-триазолид аммония моногидрат (3)



С полученными образцами были проведены исследования: структуры, спектральных свойств, термической стабильности, химической стойкости. Выполнены термодинамические расчеты взрывчато-энергетических характеристик. Кроме того, получены данные о кинетике термического разложения в медленных и быстрых процессах. Механизм химических реакций определялся изоконверсионными методами. Кристаллическая структура, молекулярное строение определено совокупностью методов порошковой рентгеновской дифрактометрии, КР и ИК-Фурье спектроскопии.

В результате получены и показаны термически стабильные до 170–205°C ион-молекулярные сокристаллы (соли) на основе НТО, обладающие несколько меньшими, чем гексоген взрывчатыми свойствами, однако превосходящие его по энергетике и безопасности.

Литература

1. **Zhang, M.** Promising hydrazinium 3-Nitro-1,2,4-triazol-5-one and its analogs [Text] / M. Zhang, C. Li, H. Gao, W. Fu, Y. Li, L. Tang, Z. Zhou // J Mater Sci. – 2016. – Vol. 51. – P. 10849–10862.
2. **Yi, J.** Preparation, characterization, non-isothermal reaction kinetics, thermodynamic properties, and safety performances of high nitrogen compound: Hydrazine 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one complex [Text] / J. Yi, F. Zhao, H. Gao, S. Xu, M. Wang, R. Hu // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 153. – P. 261–268.
3. **Patient 5274105 US.** Hydroxylammonium salts of 5-Nitro-1,2,4-triazol-3-one [Text].

SYNTHESIS AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF 3-NITRO-4,5-DIHYDRO-1,2,4-TRIAZOL-5-ONE SALTS

D. S. Yachevsky¹, A. V. Stankevich^{1,2}, G. L. Rusinov¹, I. V. Chemagina², V. N. Charushin¹

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

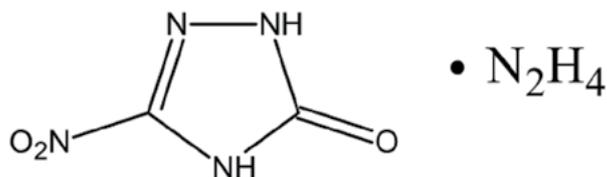
²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Improving the safety of energetic materials while preserving their explosive properties is a primary task in the synthesis of molecules and molecular crystals, including co-crystals and salts. One of the ways to increase stability, with a possible increase in the heat of explosive transformation of energetic materials, is

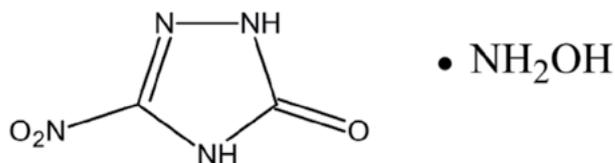
to create co-crystals or ion-molecular complexes containing two or more molecules in the volume of an elementary cell of a crystalline solid.

For the synthesis of thermally stable ion-molecular crystals (salts) in this work, a heat-resistant compound 3-nitro-4,5-dihydro-1,2,4-triazol-5-one (NTO) was used as a starting compound. Salts (1–3) [1–3] were obtained by the interaction of NTO with the corresponding amines in methanol (in the case of hydroxylamine hydrochloride – in the presence of KOH equivalent).

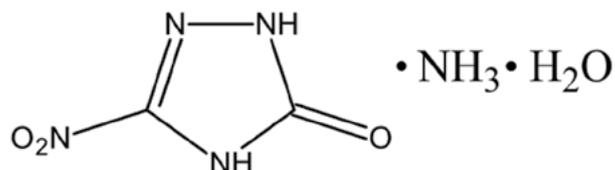
3-nitro-5-oxo-4,5-dihydro-1,2,4-triazolyl hydrazinium (1)



3-nitro-5-oxo-4,5-dihydro-1,2,4-triazolyl hydroxylammonium (2)



3-nitro-5-oxo-4,5-dihydro-1,2,4-triazolyl ammonium monohydrate (3)



The following studies were carried out with the obtained samples: structure, spectral properties, thermal stability, chemical resistance. Thermodynamic calculations of explosive-energy characteristics are performed. In addition, data on the kinetics of thermal decomposition in slow and fast processes were obtained. The mechanism of chemical reactions was determined by iso-conversion methods. The crystal structure and molecular structure are determined by a combination of methods of powder x-ray diffraction, Raman and FTIR spectroscopy.

As a result, thermally stable up to 170–205°C ion-molecular co-crystals (salts) based on NTO have been obtained and shown to have slightly less explosive properties than RDX, but surpassing it in energy and safety.

References

1. **Zhang, M.** Promising hydrazinium 3-Nitro-1,2,4-triazol-5-one and its analogs [Text] / M. Zhang, C. Li, H. Gao, W. Fu, Y. Li, L. Tang, Z. Zhou // *J Mater Sci.* – 2016. – Vol. 51. – P. 10849–10862.
2. **Yi, J.** Preparation, characterization, non-isothermal reaction kinetics, thermodynamic properties, and safety performances of high nitrogen compound: Hydrazine 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one complex [Text] / J. Yi, F. Zhao, H. Gao, S. Xu, M. Wang, R. Hu // *Journal of Hazardous Materials.* – 2008. – Vol. 153. – P. 261–268.
3. **Patient 5274105 US.** Hydroxylammonium salts of 5-Nitro-1,2,4-triazol-3-one [Text].

СИНТЕЗ И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ПОЛИАЗОТСОДЕРЖАЩИХ ПРОИЗВОДНЫХ [1,2,4]ТРИАЗОЛО[4,3-*b*][1,2,4,5]ТЕТРАЗИНА

*С. Г. Толщина¹, А. В. Коротина¹, Р. И. Ишметова¹, А. В. Станкевич^{1,2}, И. В. Чемагина²,
Г. Л. Русинов¹, В. Н. Чарушин¹*

¹Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Производные [1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразина (ТТА) некоторое время рассматриваются как перспективные энергетические материалы, и в будущем могут найти применение в различных областях при использовании энергии, образованной в результате химических превращений самоподдерживающегося разложения, например в авиа и автотранспорте [1–3]. Для понимания безопасности при реализации энергетического потенциала данного класса соединений необходимо учитывать их термическую стабильность, термодинамические свойства и кинетику процессов разложения.

В настоящей работе синтезированы восемь полиазотсодержащих гетероциклических производных ТТА и проведены исследования их термической стабильности. Стоит отметить, что в исследуемом ряду соединений некоторые молекулы служат исходными для синтеза высокоэнергетических материалов, имеющих приемлемые характеристики по безопасности на уровне тринитротолуола и мощности на уровне гексогена. Например, 3,6-диамино[1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразин, термически стабилен до 350°C, а (3-амино[1,2,4]триазоло[4,3-*b*][1,2,4,5]тетразин-6-ил)гуанидин, стабилен до 320°C. Полученные соединения имеют высокие показатели плотности от 1,56 до 1,91 г/см³, и оценочные взрывчато-энергетические характеристики, анализ которых выполнен методами классической термодинамики и гидродинамики.

Таким образом, получены и исследованы некоторые новые энергетические полиазотсодержащие соединения, которые могут быть использованы в качестве высокоэнергетических веществ, а также в качестве исходных компонентов их синтеза.

Литература

1. **Luo, Y.** Nitrification Progress of Nitrogen-Rich Heterocyclic Energetic Compounds: A Review [Text] / Y. Luo, W. Zheng, X. Wang, F. Shen // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, No. 5. – P. 1465.
2. **Herweyer, D.** Modern trends in “Green” primary energetic materials [Text] / D. Herweyer, J. L. Brusso, M. Murugesu // *New Journal of Chemistry*. – 2021. – Vol. 45, No. 23. – P. 10150–10159.
3. **Pagoria, P. F.** A review of energetic materials synthesis [Text] / P. F. Pagoria, G. S. Lee, A. R. Mitchell, R. D. Schmidt // *Thermochimica acta*. – 2002. – Vol. 384, No. 1–2. – P. 187–204.

SYNTHESIS AND THERMAL STABILITY OF SOME POLYNITROGEN-CONTAINING DERIVATIVES OF [1,2,4]TRIAZOLO[4,3-*b*][1,2,4,5]TETRAZINE

*S. G. Tolshchina¹, A. V. Korotina¹, R. I. Ishmetova¹, A. V. Stankevich^{1,2}, I. V. Chemagina²,
G. L. Rusinov¹, V. N. Charushin¹*

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

Derivatives of [1,2,4]triazolo[4,3-*b*][1,2,4,5]tetrazine (TTA) have been considered for some time as promising energetic materials, and in the future may find application in various fields when using energy formed as a

result of chemical transformations of self-sustaining decomposition, for example in aviation and motor transport [1–3]. To understand the safety when realize the energy potential of this class of compounds, it is necessary to take into account their thermal stability, thermodynamic properties and the kinetics of decomposition processes.

In this work, eight poly nitrogen-containing heterocyclic derivatives of TTA have been synthesized and studies of their thermal stability have been carried out. It is worth noting that in the studied series of compounds, some molecules serve as starting materials for the synthesis of high-energy materials that have acceptable safety characteristics at the level of trinitrotoluene and power at the level of RDX. For example, 3,6-diamino[1,2,4]triazolo[4,3-b][1,2,4,5]tetrazine is thermally stable up to 350°C, and (3-amino[1,2,4]triazolo[4,3-b][1,2,4,5]tetrazine-6-yl)guanidine is stable up to 320°C. The obtained compounds have high densities from 1,56 to 1,91 g/cc, and estimated explosive-energy characteristics, the analysis of which was carried out by methods of classical thermodynamics and hydrodynamics.

Thus, some new energy poly nitrogen-containing compounds have been obtained and investigated, which can be used as high-energetic materials, as well as initial components of their synthesis.

References

1. **Luo, Y.** Nitrification Progress of Nitrogen-Rich Heterocyclic Energetic Compounds: A Review [Text] / Y. Luo, W. Zheng, X. Wang, F. Shen // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, No. 5. – P. 1465.
2. **Herweyer, D.** Modern trends in “Green” primary energetic materials [Text] / D. Herweyer, J. L. Brusso, M. Murugesu // *New Journal of Chemistry*. – 2021. – Vol. 45, No. 23. – P. 10150–10159.
3. **Pagoria, P. F.** A review of energetic materials synthesis [Text] / P. F. Pagoria, G. S. Lee, A. R. Mitchell, R. D. Schmidt // *Thermochimica acta*. – 2002. – Vol. 384, No. 1–2. – P. 187–204.

2-41

СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА

1-(ДИФТОРАМИНО)ДИНИТРОМЕТИЛ-3,4-ДИНИТРО-1Н-ПИРАЗОЛА

К. Ю. Супоницкий¹, Т. К. Шкинева¹, И. Л. Далингер¹, А. В. Станкевич²

¹Институт органической химии им. Н. Д. Зеленского РАН, Москва, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Кристаллическая структура, а также строение молекул синтезируемых веществ, полученные из эксперимента являются основной информацией, показывающей предположения о химической чистоте вещества, электронных свойствах и природе образования кристаллов. Получение количественных данных о строении молекул и кристаллов: тип и длина внутри и межмолекулярных связей, валентные углы, параметры элементарной ячейки, а также субструктурные характеристики определяются методами рентгеновской дифракции.

В данной работе методами монокристаллической рентгеновской дифракции проведены прецизионные исследования кристаллической структуры, молекулярного строения и электронных свойств 1-(дифторамино)динитрометил-3,4-динитро-1Н-пиразола. Показано, что молекулы данного соединения упакованы в моноклинную кристаллографическую систему с группой симметрии $P2_1/c$ и параметрами элементарной ячейки $a = 13,1857(3)$; $b = 6,7793(2)$; $c = 13,0949(3)$; $\beta = 116,8665(8)$. Число формульных единиц в объеме элементарной ячейки равно 4. Кристаллическая плотность при 100 К составила $1,992 \text{ г/см}^3$. Кристаллическая упаковка соединения стабилизирована исключительно слабыми взаимодействиями: $O(N)\dots O(N)$ и слабыми $O\dots\pi$ контактами и водородными связями $C-H\dots O$.

Структуры расшифрованы прямым методом и уточнены полноматричным МНК в анизотропном приближении для неводородных атомов по F^2_{hkl} . Положения атомов водорода локализованы из разностного синтеза электронной плотности, и уточнены в изотропном приближении. Уточнение проводили с использованием программного комплекса SHELXT.

STRUCTURE AND ELECTRONIC PROPERTIES FOR 1-(DIFLUOROAMINO)DINITROMETHYL-3,4-DINITRO-1H-PYRAZOLE

K. Yu. Suponitskiy¹, T. K. Shkineva¹, I. L. Dalinger¹, A. V. Stankevich²

¹N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, RAS, Moscow, Russia

²FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

The crystal structure, as well as the structure of the molecules of synthesized substances obtained from the experiment are the main information showing assumptions about the chemical purity of the substance, electronic properties and the nature of crystal formation. Obtaining quantitative data on the structure of molecules and crystals: the type and length of intra and intermolecular bonds, valence angles, unit cell parameters, as well as substructural characteristics are determined by x-ray diffraction methods.

In this work, precision studies of the crystal structure, molecular structure and electronic properties of 1-(difluoroamino)dinitromethyl-3,4-dinitro-1H-pyrazole were carried out using single-crystal x-ray diffraction. It is shown that the molecules of this compound are packed into a monoclinic crystallographic system with the symmetry group $P2_1/c$ and the unit cell parameters $a = 13.1857(3)$; $b = 6.7793(2)$; $c = 13.0949(3)$; $\beta = 116.8665(8)$. The number of formula units in the unit cell volume is 4. The crystal the density at 100 K was 1,992 g/cc. The crystal packing of the compound is stabilized exclusively by weak interactions: O(N)...O(N) and weak O... π contacts and C-H...O hydrogen bonds.

The structures were deciphered by the direct method and refined by the full-matrix LSM in the anisotropic approximation for non-hydrogen atoms according to F^2_{hkl} . The positions of hydrogen atoms are localized from the difference synthesis of electron density, and refined in the isotropic approximation. The refinement was carried out using the SHELXT software package.

2-42

РАЗЛОЖЕНИЕ ОКТОГЕНА В НЕГЕРМЕТИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, А. А. Костерова, В. Н. Алфимов

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва, Россия

Исследование кинетики разложения октогена в большинстве случаев проводились либо в открытых ячейках при возможности ухода газообразных продуктов разложения из зоны реакции, либо в герметичных условиях при относительно небольших плотностях заполнения объема ячейки образцом. Основная цель таких исследований, кроме сравнительной стойкости ряда энергоемких соединений, определить начальную скорость разложения, кинетические параметры, продукты разложения и механизм распада.

При исследовании разложения октогена в статических условиях нагрева по давлению продуктов (или используя масс-спектрометр, проточный реактор с масс-спектрометром FRMS) реакции получено, что E меняется от 10 000 кал/моль до 67 000 кал/моль, а с использованием приборов типа ДТА, ДСК с ТГА E меняется в пределах от 38 000 кал/моль до 67 800 кал/моль.

Проведен анализ имеющихся у авторов и в литературе данных по разложению октогена в статических условиях нагрева. Получено, что только при наличии примесей экспериментальные кривые удастся удовлетворительно описать уравнением автокатализа первого порядка, в других случаях требуется уравнение автокатализа второго порядка или более сложная модель.

Показано, что значение величины энергии активации первой константы близко к 40 000 кал/моль, а высокие значения энергии активации является следствием выбора простой модели для описания экспериментальных данных, требующих для удовлетворительного описания более сложной модели.

HMX DECOMPOSITION UNDER CONSTANT PRESSURE CONDITIONS

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, A. A. Kosterova, W. N. Alfimov

Central research institute of chemistry and mechanics, Moscow, Russia

The HMX decomposition kinetics research in most cases were carried out either in open cells where the gaseous decomposition products escape from the reaction zone, or in sealed conditions with relatively small filling ratio of the cell volume with a sample. The main aim of such studies is not only to compare stability of a number of energy-intensive compounds, but also to determine the initial decomposition rate, kinetic parameters, decomposition products and the mechanism of decomposition.

During HMX decomposition studies under heating to a constant temperature by determination of pressure of the reaction products (or using a mass spectrometer, a flow reactor with a FRMS mass spectrometer), it is found that E varies from 10 000 cal/mol to 67 000 cal/mol, and using devices such as DTA, DSC with TGA E varies from 38 000 cal/mol to 67 800 cal/mol.

The data of the HMX decomposition in static heating conditions presented in the open sources was analyzed. It is found that only with the presence of impurities, experimental curves can be satisfactorily described by an autocatalysis equation of the first order, in other cases, an autocatalysis equation of the second order or a more complex model required.

It is shown that the value of the activation energy of the first constant is close to 40 000 cal/mol, and high activation energy values are determined by the usage of a simple model to describe experimental data that require a more complex model to be described satisfactorily.

2-43

РАСПАД ОКТОГЕНА В ЖИДКОЙ И ГАЗОВОЙ ФАЗАХ

П. Н. Столяров, Ю. А. Мисюрин, С. А. Атясов, А. А. Костерова

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», Москва,
Россия

Рассмотрены имеющиеся у авторов и в литературе данные по разложению октогена в газовой фазе, в расплаве и в растворе.

Расчетные данные показывают, что и в газовой фазе разложение октогена более сложно, чем в одну лимитирующую стадию, энергия активация начального процесса разложения в статических условиях нагрева близка к энергии связи N-NO₂, при динамическом нагреве наблюдается значительный разброс в значениях E от 32 000 до 52 900 кал/моль.

Экспериментальные данные по разложению 2% раствора октогена удовлетворительно описываются с использованием модели двух последовательных реакций с автокатализом распада октогена промежуточными продуктами разложения.

Исследование разложения растворов октогена в тротиле (80%, 70%, 50%, 10% и 5% содержания октогена в растворе) показало, что для описания экспериментальных данных с концентрацией октогена от 80 до 50% необходимо использовать две независимые модели автокатализа первого порядка с бимолекулярной промежуточной стадией. Экспериментальные кривые 10% и 5% раствора октогена в тротиле для удовлетворительного описания также требуют модель с двумя независимыми стадиями.

Для удовлетворительного описания экспериментальных данных по кинетике разложения октогена при скоростях нагрева 6°C/мин, 10°C/мин и 15°C/мин требуются построения кинетических моделей с учетом разложения в твердом состоянии, в расплаве, а также учета процесса расплавления октогена.

Для всех случаев рассчитаны кинетические параметры разложения октогена в различных состояниях и проведено их сравнение.

HMX DECOMPOSITION IN LIQUID AND GASEOUS PHASE

P. N. Stolyarov, J. A. Misyurin, S. A. Atyasov, A. A. Kosterova

Central Research Institute Of Chemistry And Mechanics, Moscow, Russia

The available data in the open sources on the HMX decomposition in the gas phase, in the melt phase and in solution are studied.

The calculated data shows that in the gas phase, the HMX decomposition model is more complicated than one limiting stage. The activation energy of the initial decomposition process under static heating conditions is close to the energy of the N-NO₂ bond. Dynamic heating shows a significant variation in the values of E from 32 000 cal/mol to 52 900 cal/mol.

Experimental data on the 2% HMX solution decomposition are satisfactorily described by a two consecutive reactions with autocatalysis model of RDX decomposition activated by intermediate decomposition products.

Investigation of HMX decomposition solutions in TNT (80%, 70%, 50%, 10% and 5% of the HMX content in solution) showed that experimental data with an RDX concentration of 80 to 50% require two independent models of first-order autocatalysis with a bimolecular intermediate stage. Experimental curves of 10% and 5% HMX solution in TNT also require a model with two independent stages.

Kinetic models of thermal decomposition in the solid state and in the melt phase, as well as the process of HMX melting are required to describe experimental data of the HMX decomposition at heating rates of 6°C/min, 10°C/min and 15°C/min.

Kinetic parameters of HMX decomposition in various states are calculated for all cases and their comparison is carried out.

2-44

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ КЛАССА АРОМАТИЧЕСКИХ НИТРОСОЕДИНЕНИЙ

А. Ю. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, Н. А. Алехина, А. Н. Филимоненко

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Ультразвуковая обработка, как способ диспергирования, широко распространен в различных областях промышленности и подробно изучался многими исследователями. В зависимости от применяемых режимов и интенсивности ультразвука возможно получать требуемую дисперсность обрабатываемых материалов [1] и/или придавать материалам различную дефектность [2]. Однако до настоящего времени опубликовано мало работ где ультразвуковому воздействию подвергались бы взрывчатые вещества (далее – ВВ). Так, в работах [3, 4] показано, что ультразвуковая обработка кристаллов вторичного ВВ из класса нитраминов позволяет повысить детонационную способность пластичного ВВ на их основе. В данной работе ультразвуковой обработке подвергались суспензии взрывчатого вещества из класса ароматических нитросоединений в воде при различных режимах воздействия ультразвука (см. рис. 1).

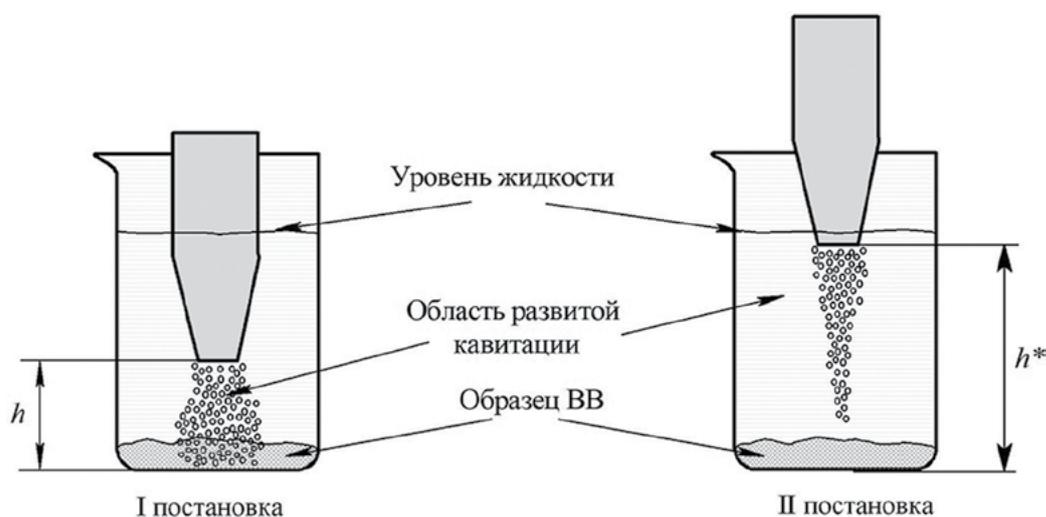


Рис. 1. Схемы обработки суспензий ультразвуком:

I постановка – кавитационный режим; II постановка – докавитационный режим. Высота (h , h^*) от источника ультразвука до дна контейнера составляла 40, 80 мм

Показано, что ультразвуковая обработка кристаллов взрывчатого вещества из класса ароматических нитросоединений оказывает влияние на физико-химические характеристики, такие как морфология, величина удельной поверхности, пористость и пикнометрическая плотность. Так, характеристики пористости и плотности кристаллов, обработанных в кавитационном режиме, линейно меняются от времени обработки; те же характеристики кристаллов, обработанных в докавитационном режиме увеличиваются до ≈ 30 минут обработки, после чего остаются примерно постоянными. Увеличение продолжительности обработки ВВ с 5 до 30 минут способствует увеличению показателя удельной поверхности в ≈ 10 раз – для кавитационного режима и в ≈ 5 раз – для докавитационного. Аналогичным образом меняется пористость ВВ после обработки. Ультразвуковое воздействие приводит к увеличению плотности кристаллов на $\approx 12,5$ – 15% . При этом не наблюдается зависимости плотности от длительности обработки. Морфологический анализ показал, что для обработки в обеих постановках при увеличении времени ультразвукового воздействия размеры кристаллов ВВ уменьшаются и появляется высокодисперсная фракция, с размером частиц $0,2$ – $3,4$ мкм. Разрушение крупных кристаллов происходит с некоторыми особенностями: кристаллы после разрушения имеют преимущественно плоскую форму с большим количеством поверхностных дефектов в виде сколов, трещин, выбоин, каверн и др.

Литература

1. Агранат, Б. А. Ультразвуковая технология [Текст]. – М. : «Металлургия», 1974. – 504 с. – С. 185–186, 285–293.
2. Ультразвук / под ред. И. П. Голяминой. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с. – С. 116–118.
3. Пат. 2768622 Российская Федерация, МПК С06В 21/00. Способ повышения детонационной способности вторичных ВВ [Текст] / А. Ю. Тарасов, А. В. Сарафанников, В. Н. Дунаев, Н. П. Тайбинов ; заявитель и патентообладатель ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина». – № 2021009717 ; заявл. 05.07.20212 ; опубл. 24.03.2022.
4. Тарасов, А. Ю. Влияние ультразвуковой обработки кристаллов ВВ из класса нитраминов на детонационную способность деталей [Текст] / А. Ю. Тарасов и др. // Боеприпасы XXI века. – 2022. – Т. 1, № 2. – С. 324–326.

EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT ON PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF CRYSTALS OF INDIVIDUAL HIGHLY EXPLOSIVE NITRO AROMATIC COMPOUND

A. Yu. Tarasov, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, N. A. Alekhina, A. N. Filimonenko

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

The ultrasonic treatment as a dispersion method is widely used in various industries and has been studied comprehensively by many researchers. Depending on the applied ultrasound conditions and intensity it is possible to obtain the required dispersity of treated materials [1] and/or to introduce different defects to materials [2]. But until now only few papers devoted to ultrasonic treatment of high explosives (HE) have been published. It is reported in [3, 4] that ultrasonic treatment of secondary HE crystals of nitramine class contributes to the enhanced detonability of nitramine-based plastic HE. The paper describes ultrasonic treatment of suspensions of a highly explosive nitro aromatic compound under different ultrasound conditions (see fig. 1).

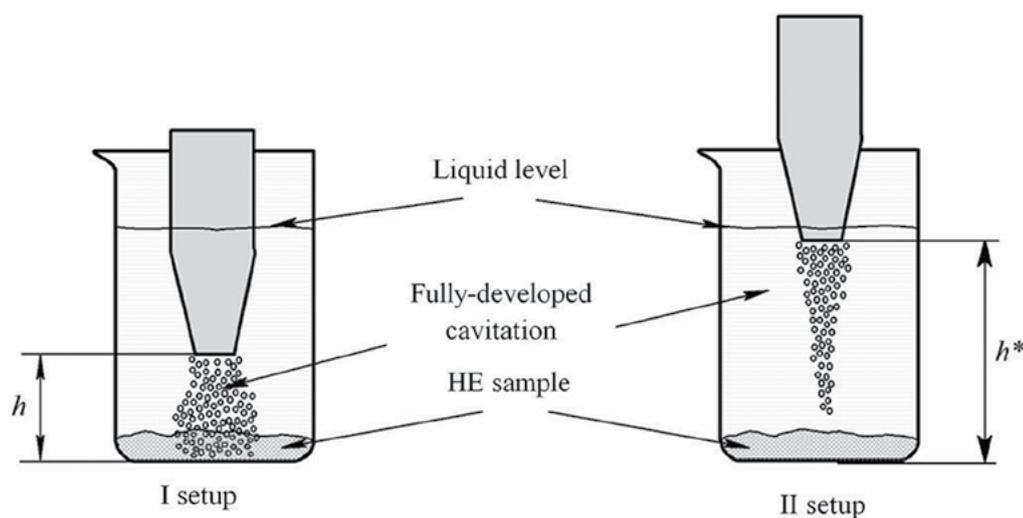


Fig. 1. Ultrasound suspension treatment scheme:

I setup – cavitation conditions; II setup – subcavitation conditions. The height (h , h^*) from the ultrasound source to the container bottom was equal to 40 and 80 mm, respectively.

It is shown that ultrasonic treatment of crystals of the highly explosive nitro aromatic compound exerts an effect on physical and chemical characteristics such as morphology, specific surface area, porosity, and pycnometric specific gravity. Thus, porosity and density characteristics of crystals treated in cavitation conditions vary linearly depending on the treatment time; the same characteristics of crystals treated in subcavitation conditions increase over ≈ 30 minutes of treatment time and then they remain nearly constant. The increase of HE treatment time from 5 to 30 minutes results in about tenfold increase in specific surface for cavitation conditions and about fivefold increase for subcavitation conditions. Similarly, the treatment influences the HE porosity. Ultrasound exposure leads to the increase in crystal density by ≈ 12.5 –15%, whereas no density dependence on treatment time is observed. The morphological analysis has shown that the higher ultrasonic exposure time in both experimental setups reduces the HE crystal sizes and induces a fine fraction with particle size of 0.2–3.4 μm . Some peculiarities are observed during coarse crystal damage, that is, the crystals after damage mostly have a plane shape with a great number of surface defects in the form of spalls, cracks, dents, caverns, etc.

References

1. **Agranat B. A.** Ultrasonic Technology [Text]. – М. : Metallurgiya, 1974. – 504 p. – P. 185–186, 285–293.
2. **Ultrasound** / edited by I. P. Golyamina. – М. : Sovetskaya Entsyclopedia, 1979. – 400 p. – P. 116–118.
3. **Pat. 2768622 Russian Federation, MPK C06B 21/00.** Secondary HE Detonability Enhancement Method [Text] / A. Yu. Tarasov, A. V. Sarafannikov, V. N. Dunaev, N. P. Taibinov ; FSUE “RFNC – VNIITF”. – No. 2021119717 ; Reg. 05.07.2021 ; Publ. 24.03.2022.
4. **Tarasov, A. Yu.** The Effect of Ultrasonic Treatment of Nitramine-class HE Crystals on Parts Detonability [Text] / A. Yu. Tarasov et al. // XXI Century Munitions. – 2022. – Vol. 1, No. 2. – P. 324–326.

2-45

ИСПАРЕНИЕ НАГРЕТОГО 2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА И ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЛАВА НА ПОЛУЧАЕМУЮ ПОЛИМОРФНУЮ МОДИФИКАЦИЮ

*А. Ю. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. А. Гайсина,
А. В. Соболевская, И. В. Чемагина*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

В работе представлены результаты исследований низкочувствительного взрывчатого вещества 2,4-динитроанизол (далее ДНА) [1–3]. Методами термогравиметрии (далее ТГА) и дифференциального термического анализа (далее ДТА) исследовалась термическая стойкость, методом ДТА определялись температуры плавления и интенсивного термического разложения, а также полиморфные модификации кристаллизованного вещества. Продукты, выделяющиеся при нагревании навески ДНА, были идентифицированы методом ИК-Фурье спектроскопии.

Показано, что расплав ДНА при перегреве интенсивно испаряется, что может спровоцировать образование взрывоопасной паровоздушной смеси. Наиболее интенсивно процесс испарения проходит в интервале температур от 220 до 300°C. Рассматривая склонность ДНА к испарению, с точки зрения использования его в смесевых ВВ, и специфику его воздействия на организм человека, наиболее оптимально процесс плавления проводить в нагревателях закрытого типа.

В работе показана связь получаемой кристаллической модификации ДНА от скорости охлаждения расплава. Так при охлаждении за счет естественного теплоотвода на ДТА-кривых наблюдается два эндотермических пика, которые соответствуют двум полиморфным модификациям ДНА с температурами плавления 85 и 93°C. При контролируемой скорости охлаждения ДНА кристаллизуется в полиморфной модификации с температурой плавления 85°C. Полученные результаты свидетельствуют о возможности получения требуемой кристаллической модификации ДНА варьируя скорость охлаждения расплава.

Ранее в работе [4] показано, что полиморфная модификация с температурой плавления 85°C менее стабильна и со временем переходит в полиморфную модификацию с температурой плавления 93°C. Поэтому, рассматривая наличие полиморфного перехода ДНА в области температур плавления и кристаллизации, с точки зрения использования ДНА в смесевых ВВ, становится очевидной необходимость оптимизации режимов кристаллизации ДНА с целью гарантированного получения термостойкой (стабильной) модификации при отверждении.

Литература

1. **Nuburg, S. C.** Structures of 2,4-dinitroanisole and 2,6-dinitroanisole [Text] / S. C. Nuburg, C. H. Faerman, L. Prasad, D. Palleros and N. Nudelman // Acta Cryst. Sec. C. – 1987. – C43. – P. 686–689.
2. **Xue, G.** Crystal structure of 2,4-dinitroanisole, C₇H₆N₂O₅ [Text] / G. Xue, C.-R. Gong and H.-Y. Chen // Z. Kristallogr. – NCS 222. – 2007. – P. 321–322.

3. **Samuels, P.** Irreversible Growth of DNAN [Text] // Based Formulations. Technology driven. Warfighter focused. – 2012.
4. **Тарасов, А. Ю.** Исследование термической стабильности 2,4-динитроанизола свежизготовленного и после двух лет хранения [Текст] / А. Ю. Тарасов, А. В. Сарафанников и др. // Международная конференция «Забабакхинские научные чтения». Сборник тезисов. – Снежинск : Из-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2021. – С. 74–75.

EVAPORATION OF HEATED 2,4-DINITROANISOLE AND INFLUENCE OF MELT COOLING RATE ON THE OBTAINED POLYMORPHIC MODIFICATION

*A. Yu. Tarasov, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, K. A. Gaisina,
A. V. Sobolevskaya, I. V. Chemagina*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

The given work presents the results of investigation of insensitive explosive 2,4-dinitroanisole (DNAN) [1–3]. Thermogravimetric analysis (TGA) and differential thermal analysis (DTA) were used to study thermal resistance, DTA was used to define the melting temperature, the temperature of intensive thermal decomposition, and polymorphic modifications of the crystallized material. Fourier-transform infrared spectroscopy identified products, released during DNAN heating.

It is demonstrated that overheated DNAN melt evaporates intensively which may induce the formation of highly explosive air-vapor mixture. The most intensive evaporation process occurs at the temperatures ranging from 220 to 300°C. Taking into consideration the evaporation tendency of DNAN when used in the mixed explosives and the specific character of its impact on human organism, the most optimal way is to melt it in enclosed heaters.

The work shows the relation of the obtained crystal modification of DNAN to the melt cooling rate. Thus, two endothermal peaks are observed on DTA curves due to natural heat release. The peaks are consistent with two polymorphic modifications of DNAN with the melting points of 85 and 93°C, respectively. Having the cooling rate controlled, DNAN crystallizes into polymorphic modifications with the melting point of 85°C. The obtained results show the availability of the desired DNAN crystal modification by varying the melt cooling rate.

In the earlier work [4] it is shown that the polymorphic modification with the melting point of 85.1°C is unstable and it turns into more thermally stable modification with the melting point of 93°C with time. Therefore, considering the polymorphic transition of DNAN in the melting and crystallization region with the view to its further use in the mixed explosives reveals the need for optimization of the DNAN crystallization behaviour in order to ensure the thermally stable modification under solidification.

References

1. **Nuburg, S. C.** Structures of 2,4-dinitroanisole and 2,6-dinitroanisole [Text] / S. C. Nuburg, C. H. Faerman, L. Prasad, D. Palleros and N. Nudelman // Acta Cryst. Sec. C. – 1987. – C. 43. – P. 686–689.
2. **Xue, G.** Crystal structure of 2,4-dinitroanisole, C₇H₆N₂O₅ [Text] / G. Xue, C.-R. Gong and H.-Y. Chen // Z. Kristallogr. – NCS 222. – 2007. – P. 321–322.
3. **Samuels, P.** Irreversible Growth of DNAN [Text] // Based Formulations. Technology driven. Warfighter focused. – 2012.
4. **Tarasov, A. Yu.** Investigating the thermal stability of 2,4-dinitroanisole as prepared and after two-year storage [Text] / A. Yu. Tarasov, A. V. Sarafannikov, N. P. Taibinov, K. A. Gaisina, I. V. Chemagina // Abstracts of the International Conference Zababakhin Scientific Talks. – 2021. – P. 74–75.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА КРИСТАЛЛОВ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ КЛАССА НИТРАМИНОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ДЕТОНАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ

*А. Ю. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, Н. А. Алехина, А. Н. Филимоненко,
Д. П. Дудник, В. Н. Дунаев*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Обеспечение надежности работы взрывчатых веществ (далее – ВВ) в тонких слоях является актуальной научно-технической задачей. Неоднократно наблюдалось, что различные партии взрывчатого вещества, синтезированные по одной технологии, в равных условиях постановки эксперимента могут существенно различаться по детонационной способности. В данной работе произведена попытка повлиять на детонационную способность ВВ из класса нитраминнов путем ультразвуковой обработки кристаллов ВВ.

В работе показано, что обработка кристаллов ВВ из класса нитраминнов позволила повысить детонационную способность пластичного ВВ на их основе приблизительно на 20% [1]. Ультразвуковой обработке подвергалась суспензия ВВ в акустической жидкости. При воздействии ультразвука кристаллы ВВ претерпевают следующие изменения (см. рис. 1): поверхность кристаллов приобретает выраженную шероховатость и визуально становится более дефектной, ребра кристаллов сглаживаются, часть кристаллов разрушается. Вероятнее всего, в первую очередь разрушаются сростки и агломераты кристаллов, присутствующие в исходном образце до обработки. Еще одной отличительной особенностью ультразвуковой обработки является образование высокодисперсной фракции ВВ. Можно предположить, что высокодисперсная фракция образуется при схлопывании кавитационных полостей вблизи поверхности кристаллов ВВ, в результате чего от кристаллов «откалываются» мелкие частицы, имеющие размеры 0,2–3,5 мкм.

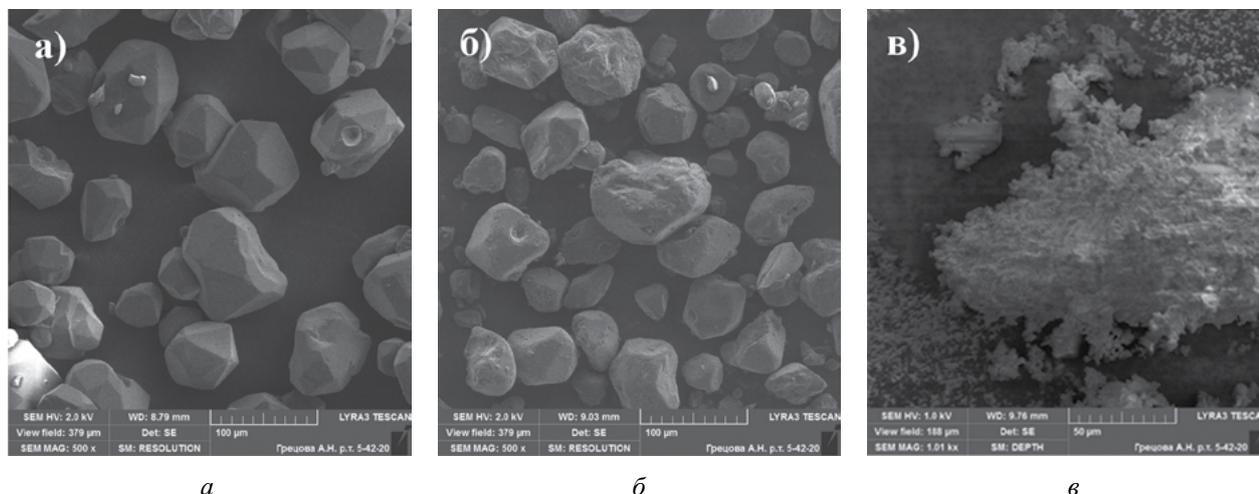


Рис. 1. Внешний вид кристаллов взрывчатого вещества из класса нитраминнов:

а – до УЗ обработки; *б* – после УЗ обработки; *в* – высокодисперсная фракция

Литература

1. Пат. 2768622 Российская Федерация, МПК С06В 21/00. Способ повышения детонационной способности вторичных ВВ [Текст] / А. Ю. Тарасов, А. В. Сарафанников, В. Н. Дунаев, Н. П. Тайбинов ; заявитель и патентообладатель ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина». – № 2021009717 ; заявл. 05.07.20212 ; опубл. 24.03.2022.

ULTRASONIC TREATMENT OF THE INDIVIDUAL NITRAMINE-EXPLOSIVE CRYSTALS AND ITS EFFECT ON THE DETONATION PROPERTIES

*A. Yu. Tarasov, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, N. A. Alekhina, A. N. Filimonenko,
D. P. Dudnik, V. N. Dunaev*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

Ensuring reliable performance of high explosives (HE) in thin layers is a relevant scientific and technological task. It has been observed repeatedly that different batches of an HE synthesized using the same technology may vary dramatically in terms of their detonation properties under equal conditions of experimentation. This work describes an attempt to affect the nitramine explosive detonation properties by ultrasonic treatment of the HE crystals.

It is demonstrated that the detonation properties of the nitramine-based plastic-bonded explosive has been improved by about 20% after treatment of the nitramine explosive crystals [1]. The HE suspension was ultrasonically treated in the acoustic fluid. Under ultrasonic treatment, the HE crystals undergo the following changes (see fig. 1): the crystal surface becomes distinctly rough and looks more defective by visual inspection, the crystal faces are smoothed, part of the crystals are destroyed. Most likely, aggregates and agglomerates of the crystals present in the original sample will be destroyed first. Fine fraction formation is also a distinctive feature of ultrasonic treatment. It can be supposed that fine fraction is formed during cavitation bubble collapse in the proximity of the HE crystal surface. As a result of this process, small particles sized 0.2–3.5 μm are broken off the crystal.

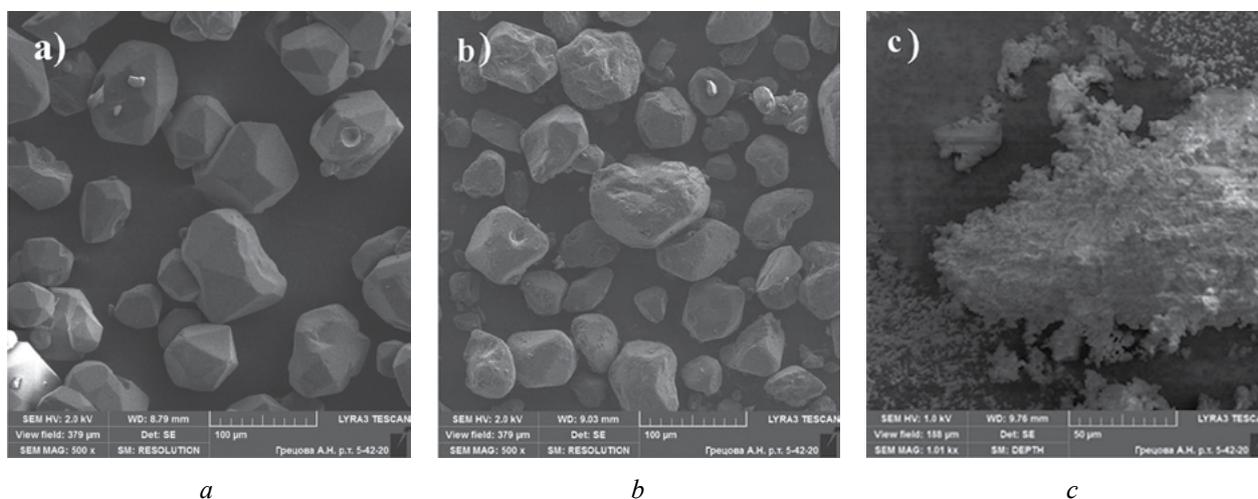


Fig. 1. Appearance of the nitramine explosive crystals:
a – before ultrasonic treatment; *b* – after ultrasonic treatment; *c* – fine fraction

References

1. **Pat. 2768622 Russian Federation, MPK C06B 21/00.** Secondary HE Detonability Enhancement Method [Text] / A. Yu. Tarasov, A. V. Sarafannikov, V. N. Dunaev, N. P. Taibinov ; FSUE “RFNC – VNIITF”. – No 2021119717 ; Reg. 05.07.2021 ; Publ. 24.03.2022.

2-47

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ПЛОСКОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

В. М. Темербеков, Д. А. Тропин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск,
Россия

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования задачи о прохождении детонационной волны (ДВ) по плоскому прямоугольному каналу с регулярно установленными препятствиями. Препятствия представляли собой прямоугольные пластины, которые разбивали исходный канал на несколько малых каналов, либо набор конечноразмерных пластин, регулярно установленных в моделируемой области. Ширина исходного канала составляла $H = 100$ мм, зазор между пластинами (l_1), их длина (l_2) и шаг их установки (l_3) варьировались. Толщина пластин составляла 2 мм. Непосредственно перед препятствиями в качестве начальных условий задавалась предварительно рассчитанная ячеистая детонационная волна. Расчеты производились в программном комплексе ANSYS Fluent. Для моделирования химической кинетики была использована приведенная кинетическая схема, которая включает в себя одну брутто-реакцию горения водорода в окислителе [1]. Используемые в настоящей работе математическая модель и численный метод были протестированы на задачах о формировании наклонных детонационных волн и оценке энергии инициирования детонации [2].

В результате было показано, что уменьшение ширины малых каналов (l_1) менее поперечного размера детонационной ячейки приводит к разрушению ячеистой структуры фронта детонации и к уменьшению скорости ее распространения. Показана возможность добиться уменьшения скорости распространения детонации, путем замены сплошных пластин конечноразмерными (рис. 1). Определено, что увеличение количества пластин (n) приводит к более сильному ослаблению детонации по сравнению с увеличением их удельного объема (ν). Увеличение удельного объема, занимаемого пластинами, а также их количества в одном ряду, в совокупности с уменьшением зазора между пластинами меньше геометрического предела существования детонационной ячейки, приводит к более существенному влиянию количества рядов пластин на ослабление детонации. Дальнейшее уменьшение зазора между пластинами приводит к более раннему разрушению ячеистой структуры детонационной волны и дальнейшему ослаблению и вырождению тройных точек. Удастся добиться более значительного снижения скорости распространения детонации (рис. 1, б) и более раннего расщепления детонационной волны на ударную волну и волну горения. При этом сокращение расстояния между пластинами (от $l_3 = 10$ мм до $l_3 = 5$ мм) приводит с одной стороны более раннему разрушению ячеистой структуры и расщеплению детонации, а с другой стороны к интенсификации лидирующей ударной волны и более высоким скоростям ее распространения (рис. 1, б).

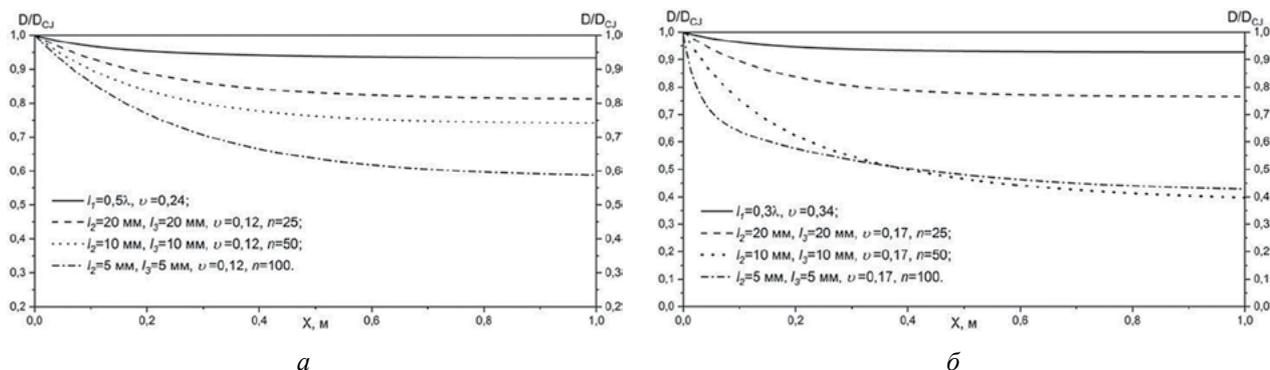


Рис. 1. Сравнение скоростей распространения ДВ для конечноразмерных пластин при $l_1 = 0,5\lambda$ (а) и $l_1 = 0,3\lambda$ (б)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>

Литература

1. **Tropin, D. A.** Problems of detonation wave suppression in hydrogen-air mixtures by clouds of inert particles in one- and two-dimensional formulation [Text] / D. A. Tropin and I. A. Bedarev // *Combustion Science and Technology*. – 2021. – Vol. 193, No. 2. – P. 197–210.
2. **Bedarev, I. A.** Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen-oxygen mixture by a high velocity projectile [Text] / I. A. Bedarev, V. M. Temerbekov // *Thermal Science*. – 2021. – Vol. 25, No. 5. – P. 3889–3897.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE GAS DETONATION PROPAGATION IN THE PLANE RECTANGULAR CHANNEL WITH OBSTACLES

V. M. Temerbekov, D. A. Tropin

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russia

This work presents the results of numerical simulation of the problem of the detonation wave (DW) passage through the flat rectangular channel with regularly installed obstacles. The obstacles were rectangular plates that divided the original channel into several small channels, or a set of finite-size plates regularly installed in the simulated area. The width of the initial channel was $H = 100$ mm, the gap between the plates (l_1), their length (l_2), and their installation step (l_3) were varied. The thickness of the plates was 2 mm. Directly in front of the obstacles, the previously calculated cellular detonation wave was set as the initial conditions. The calculations were made in the ANSYS Fluent software package. To simulate the chemical kinetics, the reduced kinetic scheme was used, which includes one overall reaction of hydrogen combustion in an oxidizer [1]. The mathematical model and numerical method used in this work were tested on the problems of the formation of the oblique detonation waves and estimation of the detonation initiation energy [2].

As a result, it was shown that a decrease in the width of small channels (l_1) less than the transverse size of the detonation cell leads to destruction of the cellular structure of the detonation front and to decrease in its propagation velocity. It was shown that it is possible to achieve a decrease in the detonation propagation velocity by replacing infinite size solid plates with the finite-size ones (fig. 1). It was determined that an increase in the number of plates (n) leads to a stronger attenuation of the detonation compared to an increase in their specific volume (v). An increase in the specific volume occupied by the plates and also their number in one row, together with the decrease in the gap between the plates below the geometric limit of the existence of the detonation cell, leads to more significant effect of the number of rows of plates on detonation attenuation. A further decreasing of the gap between the plates leads to the earlier destruction of the cellular structure of the detonation wave and the further weakening and degeneration of the triple points. It is possible to achieve a more significant decreasing of the detonation propagation velocity (fig. 1, *b*) and an earlier splitting of the detonation wave into the shock wave and the combustion wave. In this case, the decreasing of the distance between the plates (from $l_3 = 10$ mm to $l_3 = 5$ mm) leads, on the one hand, to earlier destruction of the cellular structure and splitting of the detonation, and, on the other hand, to intensification of the leading shock wave and higher velocities of its propagation (fig. 1, *b*).

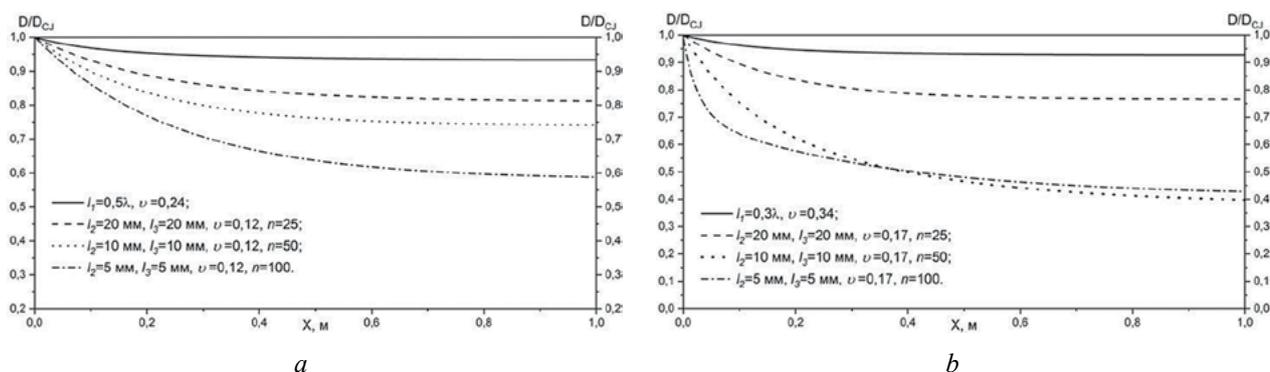


Fig. 1. Comparison of DW propagation velocities for the finite-size plates at $l_1 = 0,5\lambda$ (a) and $l_1 = 0,3\lambda$ (b)

The work was supported by Russian Science Foundation, project No. 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>

References

1. **Tropin, D. A.** Problems of detonation wave suppression in hydrogen-air mixtures by clouds of inert particles in one- and two-dimensional formulation [Text] / D. A. Tropin and I. A. Bedarev // Combustion Science and Technology. – 2021. – Vol. 193, No. 2. – P. 197–210.
2. **Bedarev, I. A.** Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen-oxygen mixture by a high velocity projectile [Text] / I. A. Bedarev, V. M. Temerbekov // Thermal Science. – 2021. – Vol. 25, No. 5. – P. 3889–3897.

2-48

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В КЛИНОВИДНЫХ ОБРАЗЦАХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ТАТБ И ОКТОГЕНА

*А. Е. Тепляков, А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников,
К. М. Просвирнин, И. Г. Галиуллин*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

В настоящей работе представлены результаты исследований по определению скорости детонационной волны (ДВ) и области ее затухания в клиновидных образцах взрывчатых веществ (ВВ), различающихся между собой природой взрывчатого наполнителя.

Исследовались взрывчатые композиции на основе триаминотринитробензола (ТАТБ), октогена и смеси наполнителей ТАТБ и октогена. Связующим компонентом во всех взрывчатых веществах выступала фторполимерная связка.

Исследования скорости ДВ и области ее затухания проводилось с помощью высокоскоростного фоторегистратора с линейной щелевой разверткой, при помощи которого регистрировались временные профили выхода ДВ на боковую поверхность клиновидного образца. Момент затухания детонации фиксировалось по характерному излому свечения границы распространения детонации, после чего были рассчитаны значения критической толщины детонации всех исследуемых ВВ, а также скорость детонации на стационарном участке.

Анализ результатов, полученных в данной работе, позволил произвести оценку влияния доли высокоэнергетического материала наполнителя на величины скорости детонации и критической толщины детонации ВВ.

INVESTIGATION OF DETONATION PROPAGATION IN TATB- AND HMX-BASED WEDGE EXPLOSIVE SAMPLES

*A. E. Teplyakov, A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov,
K. M. Prosvirnin, I. G. Galiullin*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

The given work presents the results on determining the detonation wave velocity and detonation attenuation region in wedge high-explosive (HE) samples, which differ in high-explosive component nature.

Triaminotrinitrobenzene- (TATB-), HMX-, and TATB/HMX-based HE compositions were investigated. Fluoropolymer binding was used in the studied HEs.

A linear streak camera was used to investigate detonation wave velocity and detonation attenuation region by recording time profiles of detonation wave breakout to the side surface of the wedge HE sample. The detonation attenuation time was determined by the representative light emission inflection of the detonation propagation boundary; then the critical detonation thicknesses for the studied HEs were calculated along with the detonation velocity at the steady-state portion.

The analysis of the experimental results allowed estimating the effect of highly energetic component in the studied HEs on their detonation velocities and critical detonation thicknesses.

2-49

КАЛИБРОВКА УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ОКТОГЕНА НА РЕЗУЛЬТАТАХ ОПЫТОВ ПО РАЗГОНУ ЛАЙНЕРОВ

*В. Б. Титова¹, Н. А. Володина¹, М. О. Ширшова¹, М. Н. Кирюхина¹,
Е. Н. Богданов², А. А. Становов²*

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Институт теоретической и математической физики, Саров, Россия

²Институт физики взрыва, Саров, Россия

В работе представлены результаты расчетно-экспериментального анализа результатов опытов по исследованию метательной способности пластифицированного октогена в интересах верификации уравнений состояния (УРС) его продуктов взрыва (ПВ). Экспериментально проведена непрерывная регистрации движения лайнеров из алюминия и сплава вольфрам-никель-железо (ВНЖ), метаемых продуктами взрыва пластифицированного состава на основе октогена. Проведена калибровка параметров уравнений состояния продуктов взрыва с опорой на результаты экспериментальных данных для трех форм УРС ПВ. Расчетно-теоретический анализ показал, что применение новых современных экспериментальных методов исследования позволяют проводить более качественную калибровку параметров уравнений состояния продуктов взрыва, а использование различных лайнеров получать данные для различных областей состояния вещества.

PROVING THE EQUATION OF STATE FOR THE EXPLOSION PRODUCTS OF PLASTICIZED HMX USING THE EXPERIMENTAL RESULTS ON LINERS ACCELERATION

*V. B. Titova¹, N. A. Volodina¹, M. O. Shirshova¹, M. N. Kiryuhina¹,
E. N. Bogdanov², A. A. Stanovov²*

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics”, ITMP, Sarov, Russia

²FSUE “Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics”, IPE, Sarov, Russia

The paper presents the results of computation and experimental analysis of the experimental results of the research on flying capability of the plasticized HMX aiming at verification of the equation of state (EOS) for its explosion product. A continuous registration of the liners motion was carried out; the liners were made of aluminum and of tungsten-nickel-iron, alloy and they were thrown with the explosion products of the HMX-based plasticized composition. Parameters of the EOS of the explosion products were calibrated basing on the experimental data for three forms of the EOS for its explosion products. Computation and theoretical analysis has shown that implementation of new modern experimental methods of the research allows performing more high-quality calibration of parameters of EOS of the explosion products and implementation of different liners allows producing data for different areas of the equation of state of the material.

2-50

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАНОРАЗМЕРНЫМ СЕЧЕНИЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА НА ИСТОЧНИКЕ ФОТОНОВ СКИФ: МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ВЭПП-4 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕФРАКЦИОННЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛИНЗ

*Б. П. Толочко^{3,4}, Н. И. Разумов^{3,4}, В. П. Назьмов³, К. А. Тен^{1,3}, Э. Р. Прууэл¹, И. А. Рубцов^{1,2},
Л. И. Шехтман³, А. Ю. Гармашев⁵, Д. В. Петров⁵, Е. Б. Смирнов⁵*

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Современные источники синхротронного излучения (СИ) позволяют получать пучки рентгеновского излучения с сечением в несколько нанометров. Это достигается благодаря малому эмиттансу ускорителя и использованию современной рентгеновской оптики. Коллектив авторов данной работы исследовал возможность получения пучков СИ с наноразмерным сечением для исследования структуры детонационного фронта на источнике фотонов СКИФ с пикосекундным временным разрешением.

Выполнены теоретические расчеты оптической схемы (рис. 1), использующей составные рентгеновские рефракционные линзы (РРЛ). Показано, что РРЛ можно использовать для фокусировки не только монохроматического, как утверждается в литературе [1], но и полихроматического излучения.

Из расчетов следует, что при вертикальном размере в 6 мкм электронного пучка СКИФа, за счет фокусировки на образце может быть получен вертикальный размер пучка СИ в 300 нм. При использовании вторичного источника с апертурой 2×2 мкм, апертура пучка на образце будет 100×100 нм. Из расчетов также следует, что для работы оптической схемы необходимо сузить полихроматическое излучение от диапазона 5–200 кЭв до 20–50 кЭв. Это диапазон, оптимальный для исследования детонационных процессов методами малоуглового рентгеновского рассеяния и рентгеновской интроскопии.

Для проверки выполненных расчетов был выполнен модельный эксперимент на пучке СИ ВЭПП-4 на канале № 8-б. Для этого эксперимента также были выполнены расчет оптической схемы. Во время эксперимента полихроматический пучок СИ диаметром 500 мкм направлялся на рефракционную бериллиевую линзу, фокусировался и затем регистрировался детектором. Данные измерений совпали с данными теоретических расчетов с хорошей точностью.

Реализация описанной оптической схемы откроет новые перспективы для исследования детонационных и ударно-волновых процессов на нано уровне.

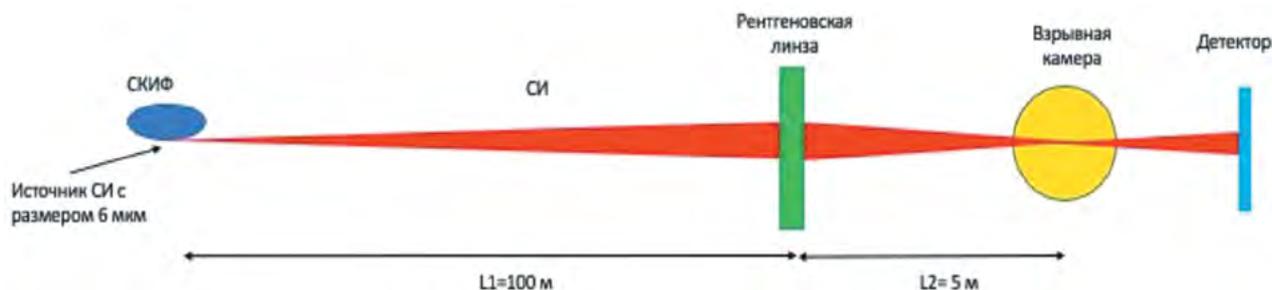


Рис. 1. Планируемая схема фокусировки пучка СИ СКИФ на исследуемый объект с помощью рефракционных линз

Литература

1. **Snigirev, A.** A compound Refractive Lens for focusing High-Energy X-rays [Text] / A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler // Nature. – 1996. – Vol. 384. – P. 49–51.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF OBTAINING SYNCHROTRON RADIATION BEAMS WITH A NANOSIZED CROSS SECTION FOR STUDYING THE STRUCTURE OF THE DETONATION FRONT AT THE SKIF PHOTON SOURCE: MODEL EXPERIMENT AT VEPP-4 USING REFRACTIVE X-RAY LENSES

B. P. Tolochko^{3,4}, N. I. Razumov^{3,4}, V. P. Nazmov³, K. A. Ten^{1,3}, E. R. Pruehl¹, I. A. Rubtsov^{1,2}, L. I. Shekhtman³, A. Yu. Garmashev⁵, D. V. Petrov⁵, E. B. Smirnov⁵

¹Institute of Hydrodynamics, M. A. Lavrentiev SB RAS, Novosibirsk, Russia

²TsKP “SKIF”, Institute of Catalysis. G. K. Boreskov SB RAS, Koltsovo, Russia

³Institute of Nuclear Physics, G. I. Budker SB RAS, Novosibirsk, Russia

⁴Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁵Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics named after Academician. E. I. Zababakhina”, Snezhinsk, Russia

Modern sources of synchrotron radiation (SR) make it possible to obtain X-ray beams with a cross section of several nanometers. This is achieved due to the low emittance of the accelerator and the use of modern X-ray optics. The team of authors of this work investigated the possibility of obtaining SR beams with a nanosized cross section to study the structure of the detonation front at the SKIF photon source with a picosecond time resolution.

Theoretical calculations of the optical scheme (fig. 1) using composite X-ray refractive lenses (RRLs) have been performed. It is shown that RRL can be used to focus not only monochromatic, as stated in the literature [1], but also polychromatic radiation. It follows from the calculations that with a vertical size of $6 \mu\text{m}$ of the SKIF electron beam, by focusing on the sample, a vertical size of the SR beam of 300 nm can be obtained. When using a secondary source with an aperture of $2 \times 2 \mu\text{m}$, the beam aperture on the sample will be $100 \times 100 \text{ nm}$. It also follows from the calculations that for the operation of the optical scheme it is necessary to narrow the polychromatic radiation from the range of $5\text{--}200 \text{ keV}$ to $20\text{--}50 \text{ keV}$. This range is optimal for studying detonation processes by small-angle X-ray scattering and X-ray introscopy.

To verify the performed calculations, a model experiment was performed on the SR beam of VEPP-4 on channel No. 8-b. For this experiment, the calculation of the optical scheme was also performed. During the experiment, a polychromatic SR beam $500 \mu\text{m}$ in diameter was directed to a refractive beryllium lens, focused, and then recorded by a detector. The measurement data coincided with the data of theoretical calculations with good accuracy.

Implementation of the described optical scheme will open up new prospects for the study of detonation and shock-wave processes at the nanolevel.

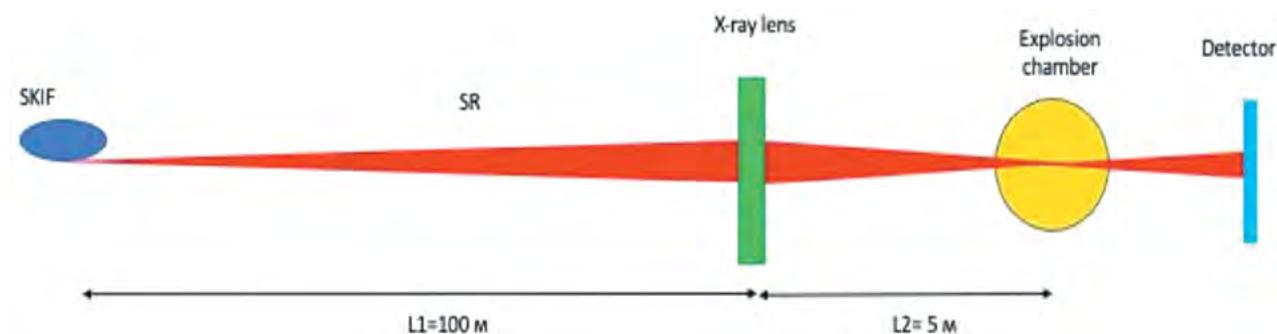


Fig. 1. Planned scheme for focusing the SR beam from SKIF on the object using refractive lenses

References

1. **Snigirev, A.** A compound Refractive Lens for focusing High-Energy X-rays [Text] / A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler // Nature. – 1996. – Vol. 384. – P. 49–51.

2-51

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЯЧЕЙСТОЙ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСЯХ ВОДОРОД – ВОЗДУХ И ВОДОРОД – КИСЛОРОД – АРГОН С ИНЕРТНЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Д. А. Тропин, К. А. Вышегородцев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск,
Россия

В работе проведено численное моделирование взаимодействия ячейстых детонационных волн (ДВ) в смесях водород-кислород-аргон и водород-воздух с инертными пористыми фильтрами. Длина расчетной области составляла 1 м , ширина подбиралась таким образом, чтобы вмещать в себя 7 детонационных ячеек. В смеси водород – воздух средний поперечный размер ячейки составил $14,29 \text{ мм}$, в смеси водород – кислород – аргон $1,8 \text{ мм}$. Ширина расчетной области составила $0,1$ и $0,0126 \text{ м}$, соответственно. В области $x \in [0,51] \text{ м}$ расположен фильтр, моделируемый как неподвижное облако инертных частиц. Для каждой смеси рассматривались фильтры с частицами диаметром 50 ,

100 и 200 мкм. Для расчетов использовалась разработанная ранее математическая модель с численным алгоритмом решения [1] и одностадийная модель химической кинетики [2].

В смеси водород – воздух реализуется нерегулярная ячеистая структура ДВ с сильными поперечными волнами. В результате расчетов было выявлено, что для срыва детонации в данной смеси помимо ослабления лидирующего фронта ДВ необходимо ослабить поперечные волны так, чтобы они не смогли воспламенить смесь. Критические концентрации (минимальные концентрации, при которых наблюдался режим срыва детонации) составили $2 \cdot 10^{-3}$, $4 \cdot 10^{-3}$ и $8 \cdot 10^{-3}$ для частиц диаметром 50, 100 и 200 мкм, соответственно. В смеси водород – кислород – аргон реализуется регулярная ячеистая структура со слабыми поперечными волнами. В этом случае при взаимодействии ДВ с фильтром происходит одновременное ослабление и лидирующего фронта и поперечных волн до параметров, которые не приводят к воспламенению смеси. Критические концентрации составили $2 \cdot 10^{-2}$, $4 \cdot 10^{-2}$ и 0,1 для частиц диаметром 50, 100 и 200 мкм, соответственно. Видно, что для подавления детонации в смеси водород – кислород – аргон требуется в 10 раз большая объемная концентрация частиц, чем в смеси водород – воздух. При этом фильтры с концентрацией частиц ниже критической в 10 раз в смеси с аргонем не оказывают влияние на структуру ДВ и размеры ячеек (рис. 1, а). По мере увеличения концентрации частиц в фильтре, структура становится слабо нерегулярной (рис. 1, б). Если концентрация выше или равна критической, происходит срыв детонации с разрушением ячеистой структуры (рис. 1, в). В водородно – воздушной смеси структура умеренно нерегулярная (рис. 2), по мере увеличения концентрации частиц в фильтре размер ячеек монотонно увеличивается.

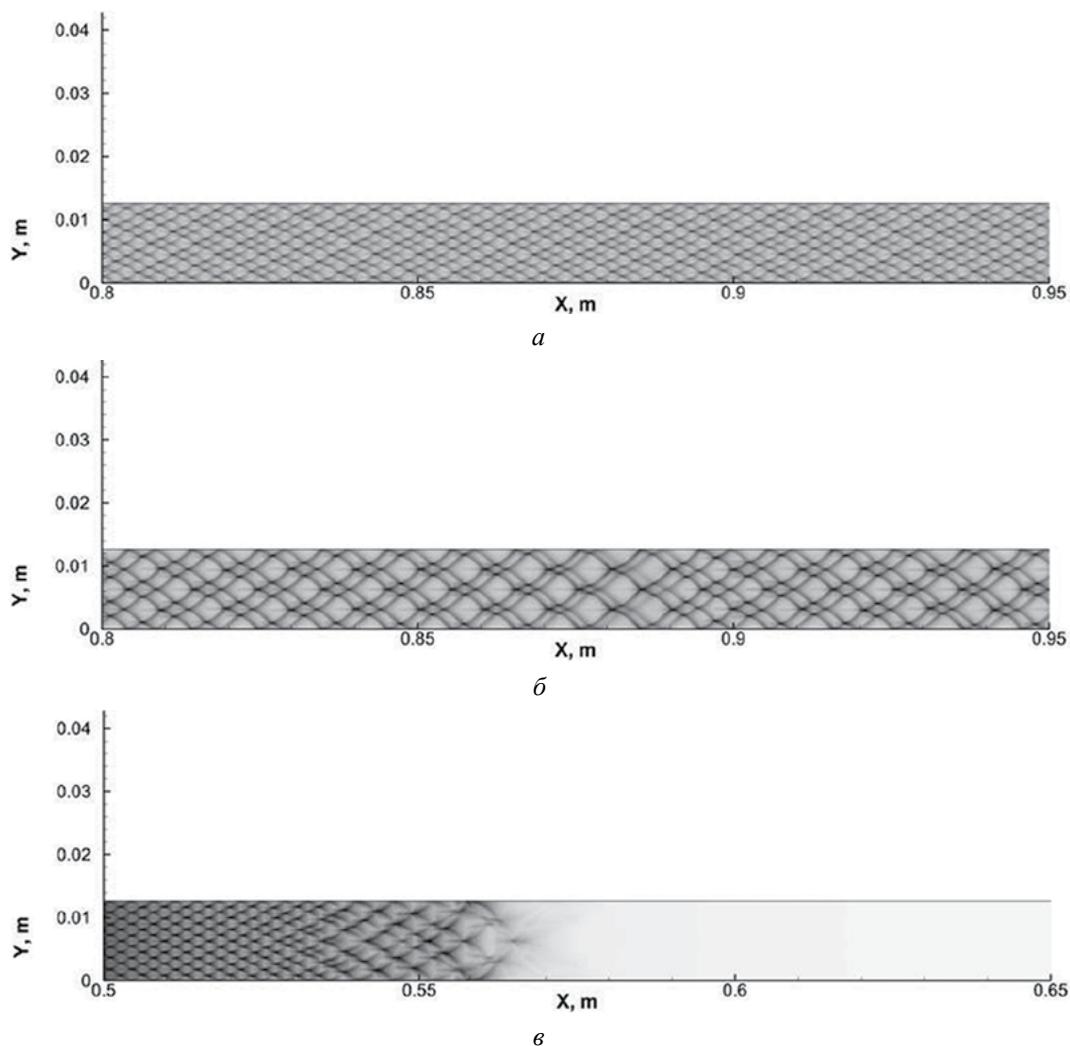


Рис. 1. Поля максимумов давления в смеси водород – кислород – аргон. Параметры фильтра: $d = 50$ мкм. а – $m_2 = 10^{-3}$; б – $m_2 = 5 \cdot 10^{-3}$; в – $m_2 = 2 \cdot 10^{-2}$

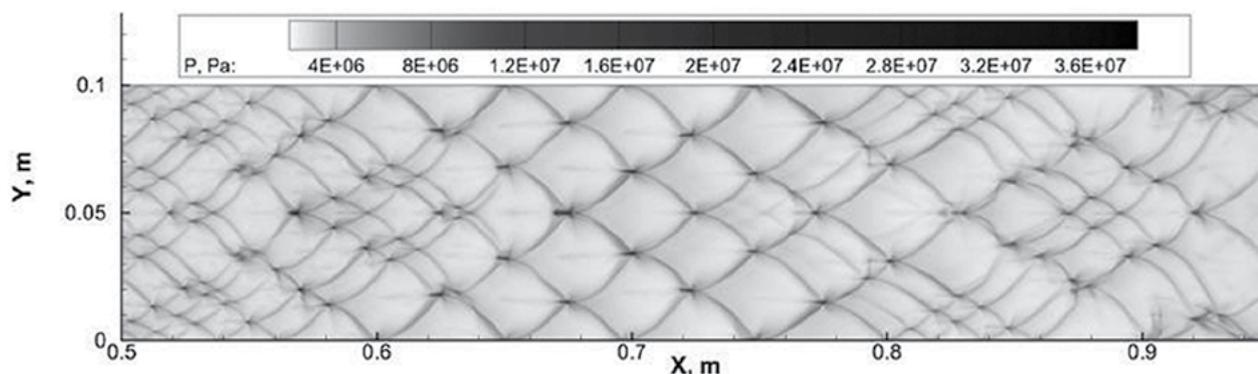


Рис. 2. Поля максимумов давления в смеси водород – воздух.

Параметры фильтра: $d = 50$ мкм, $m_2 = 10^{-3}$

В обеих смесях увеличение объемной концентрации частиц и уменьшение их диаметра приводит к увеличению размера детонационных ячеек, а наиболее эффективными для подавления являются частицы наименьших диаметров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>

Литература

1. **Bedarev, I. A.** Computation of Traveling Waves in a Heterogeneous Medium with Two Pressures and a Gas Equation of State Depending on Phase Concentrations [Text] / I. A. Bedarev, A. V. Fedorov and A. V. Shul'gin // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2018. – Vol. 58. – P. 775–789.
2. **Bedarev, I. A.** Application of Detailed and Reduced Kinetic Schemes for the Description of Detonation of Diluted Hydrogen–Air mixtures [Text] / I. A. Bedarev, K. V. Rylova and A. V. Fedorov // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2015. – Vol. 51, № 5. – P. 528–539.

INTERACTION OF CELLULAR DETONATION IN HYDROGEN–AIR AND HYDROGEN–OXYGEN–ARGON MIXTURES WITH INERT FILTERS

D. A. Tropin, K. A. Vyshegorodcev

Khristianovich institute of theoretical and applied mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Numerical modeling of the interaction of cellular detonation waves (DW) in hydrogen-oxygen-argon and hydrogen-air mixtures with inert porous filters was carried out in this work. The length of the computational domain was 1 m, the width was chosen to contain 7 detonation cells. In a hydrogen–air mixture, the average transverse cell size was 14.29 mm; in a hydrogen–oxygen–argon mixture is 1.8 mm. The width of the computational domain was 0.1 and 0.0126 m, respectively. In the area $x \in [0.51]$ m there is a filter modeled as a motionless cloud of inert particles. For each mixture, filters with particle diameters of 50, 100, and 200 μm were considered. For calculations, a previously developed mathematical model with a numerical solution algorithm [1] and a one-stage model of chemical kinetics [2] was used.

In a hydrogen-air mixture, an irregular cellular structure of the DW with strong transverse waves is realized. As a result of the calculations, it was found that in order to suppress the detonation in this mixture, in addition to attenuating the leading DW front, it is necessary to attenuate the transverse waves so that they cannot ignite the mixture. Critical concentrations (minimum concentrations at which the detonation failure mode was observed) were $2 \cdot 10^{-3}$, $4 \cdot 10^{-3}$ and $8 \cdot 10^{-3}$ for particles with a diameter of 50, 100 and 200 μm , respectively. In a hydrogen–oxygen–argon mixture, a regular cellular structure with weak transverse waves is realized. In this case, when the DW interacts with the filter, both the leading front and

transverse waves are simultaneously attenuated to parameters that do not lead to ignition of the mixture. The critical concentrations were $2 \cdot 10^{-2}$, $4 \cdot 10^{-2}$ and 0.1 for particles with a diameter of 50, 100, and 200 μm , respectively. It can be seen that in order to suppress the detonation in a hydrogen–oxygen–argon mixture, a 10 times higher volume concentration of particles is required than in a hydrogen–air mixture. At the same time, filters with a particle concentration 10 times lower than the critical one in a mixture with argon do not affect the DW structure and cell sizes (fig. 1, *a*). As the concentration of particles in the filter increases, the structure becomes slightly irregular (fig. 1, *b*). If the concentration is higher than or equal to the critical one, detonation fails with the destruction of the cellular structure (fig. 1, *c*). In the hydrogen–air mixture, the structure is moderately irregular (fig. 2). As the concentration of particles in the filter increases, the size of the cells increases monotonically.

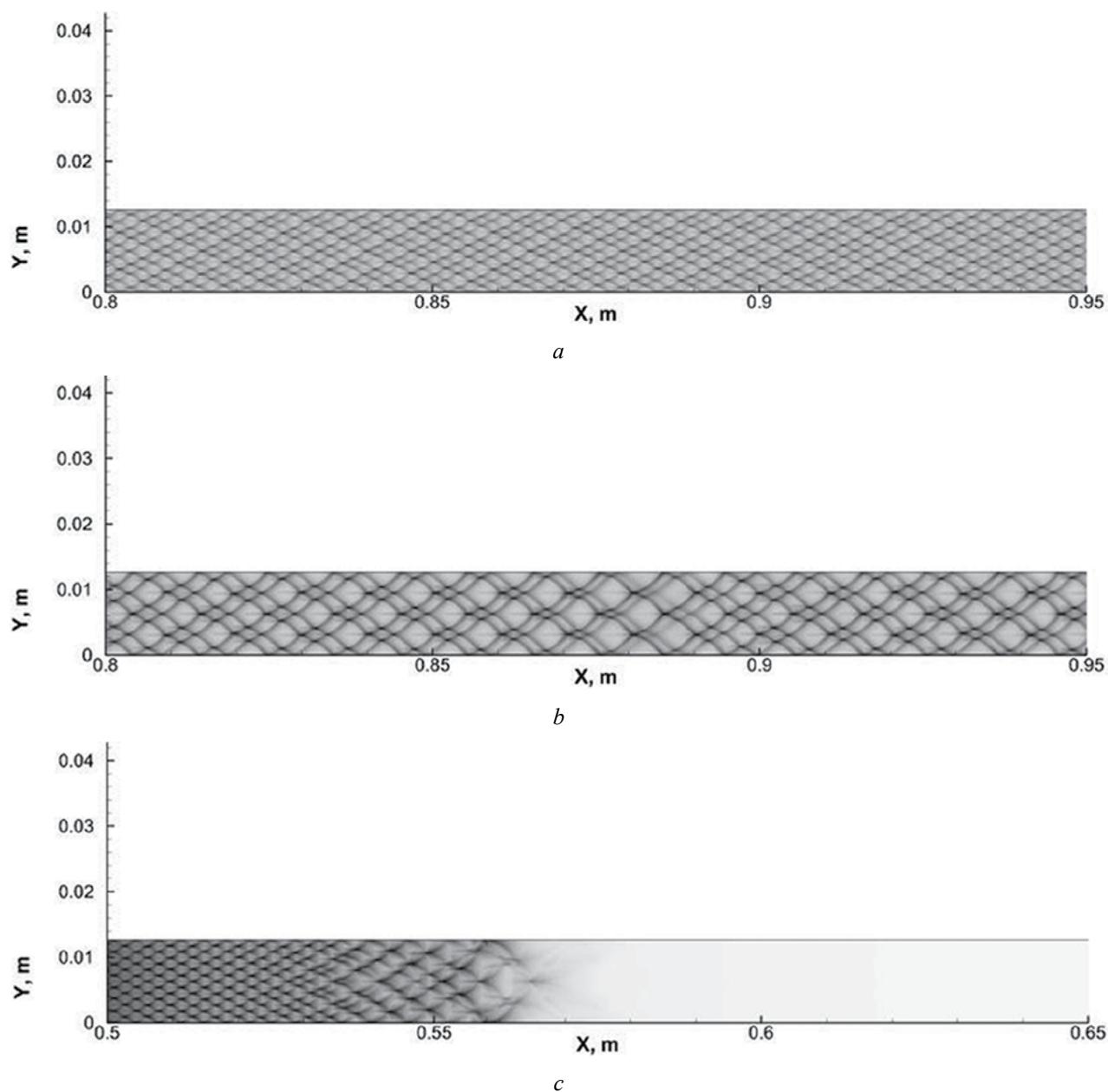


Fig. 1. Fields of maximums of pressure in a hydrogen-oxygen-argon mixture.

Filter parameters: $d = 50 \mu\text{m}$. $a - m_2 = 10^{-3}$; $b - m_2 = 5 \cdot 10^{-3}$; $c - m_2 = 2 \cdot 10^{-2}$

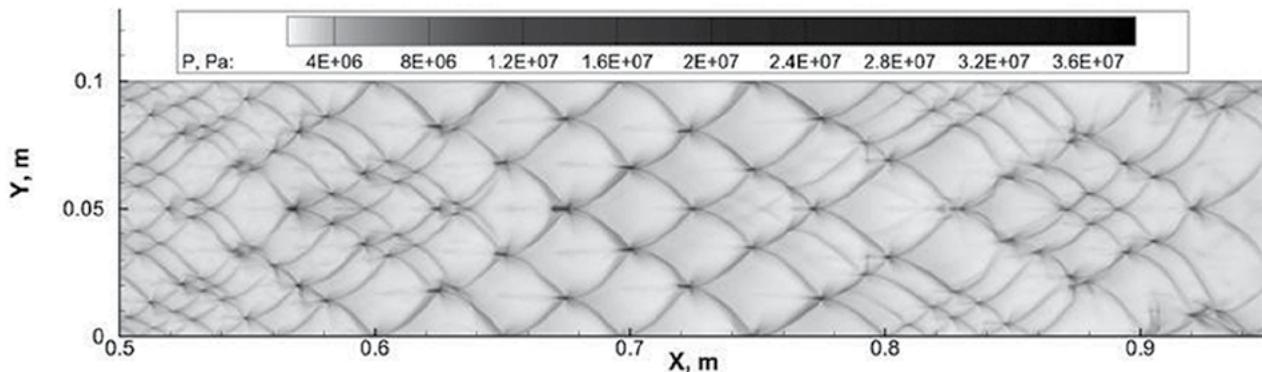


Fig. 2. Fields of maximums of pressure in a hydrogen-air mixture.

Filter parameters: $d = 50 \mu\text{m}$, $m_2 = 10^{-3}$

In both mixtures, an increase in the volume concentration of particles and a decrease in their diameter lead to an increase in the size of the detonation cells, and particles of the smallest diameters are the most effective for suppression.

The work was supported by Russian Science Foundation, project No. 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>

References

1. **Bedarev, I. A.** Computation of Traveling Waves in a Heterogeneous Medium with Two Pressures and a Gas Equation of State Depending on Phase Concentrations [Text] / I. A. Bedarev, A. V. Fedorov and A. V. Shul'gin // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2018. – Vol. 58. – P. 775–789.
2. **Bedarev, I. A.** Application of Detailed and Reduced Kinetic Schemes for the Description of Detonation of Diluted Hydrogen–Air mixtures [Text] / I. A. Bedarev, K. V. Rylova and A. V. Fedorov // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2015. – Vol. 51, No. 5. – P. 528–539.

2-52

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ ТРОТИЛА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ГЕТЕРОДИННОЙ МЕТОДИКИ

А. С. Туманик, К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, Н. П. Сатонкина

ФГБУН «Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН», Новосибирск, Россия

Для исследования детонационных процессов необходимы экспериментальные методики измерений с временным разрешением лучше одной микросекунды, способные работать в экстремальных условиях (высокие температуры и давления, световое излучение). Все это ставит серьезные требования к аппаратуре, с помощью которой можно изучать процесс.

Целью работы было изучение возможностей лазерной гетеродинной методики (ЛГМ) при исследовании детонации. Для этого была собрана установка, реализующая принципы ЛГМ, и с ее использованием проведен ряд экспериментов по исследованию структур детонационного фронта прессованного и литого тротила.

При исследовании структуры детонационного фронта была измерена массовая скорость в двух преградах (LiF и ПММА) с различным ударно-волновым импедансом. Измеренная зависимость скорости от времени на контактной границе отличается от той которая была в исследуемом заряде. Для пересчета измеренной возмущенной скорости границы экрана в истинные параметры Чепмена–Жуге была использована методика, учитывающая газодинамику течения на контактной границе [1]. Экспериментальные данные обрабатывались с помощью алгоритма, реализованного на языке

программирования Python, в основе которого лежит быстрое преобразование Фурье. Для каждого эксперимента были подобраны оптимальные параметры, обеспечивающие необходимое временное разрешение и разрешение по скоростям.

Результатом работы стала подготовка и сборка измерителя скорости, основанного на ЛГМ, позволяющего определять параметры детонации Чепмена-Жуге для прессованного и литого зарядов тротила.

Литература

1. Долгобородов, А. Ю. Влияние физико-химических превращений на распространение ударных волн в конденсированных веществах: специальность: 01.04.17 «Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва» автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Долгобородов Александр Юрьевич. – Москва, 2008. – 44 с. – Библиогр.: С. 41–44. – Место защиты: Ин-т химической физики им. Н. Н. Семенова РАН.

DETERMINATION OF TNT DETONATION PARAMETERS USING PHOTON DOPPLER VELOCIMETRY

A. S. Tumanik, K. A. Ten, E. R. Prueel, N. P. Satonkina

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

The study of detonation processes requires experimental measurement techniques with a time resolution better than one microsecond, capable of operating under extreme conditions (high temperatures and pressures, light radiation). All this puts serious demands on the equipment with which you can study the process.

The aim of the work was to study the possibilities of Photon Doppler velocimetry (PDV) in the study of detonation. To this end, an experimental setup was assembled that implements the principles of PDV, and with its use a number of experiments were carried out to study the structures of the detonation front of pressed and cast TNT.

When studying the structure of the detonation front, the mass velocity was measured in two barriers (LiF and PMMA) with different shock-wave impedance. The measured dependence of velocity on time at the contact boundary differs from that in the explosive under study. To convert the measured perturbed velocity of the contact boundary into the true Chapman–Jouguet parameters, a technique was used that takes into account the gas dynamics of the flow at the contact boundary [1]. The experimental data were processed using an algorithm implemented in the Python programming language, which is based on the fast Fourier transform. Optimal parameters were selected for each experiment to provide the necessary time resolution and velocity resolution.

The result of the work was the preparation and assembly of a velocity meter based on PDV, which allows determining the parameters of the Chapman–Jouguet detonation for pressed and cast TNT charges.

References

1. Dolgoborodov, A. Yu. Influence of physical and chemical transformations on the propagation of shock waves in condensed matter: specialty: 01.04.17 “Chemical physics, including the physics of combustion and explosion” dissertation abstract for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences / Dolgoborodov Alexander Yurievich. – Moscow, 2008. – 44 p. – Bibliography: P. 41–44.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ СГОРАЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ МИНОМЕТНЫХ И АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ВЫСТРЕЛОВ В ЖЕСТКИХ СГОРАЮЩИХ КАРТУЗАХ

Р. В. Фаталиев, С. В. Солдатов, А. Ю. Осипова, Т. А. Енейкина, Р. Ф. Гатина, Ю. М. Михайлов
ФКП Научно-исследовательский институт химических продуктов, Казань, Россия

При создании сгорающих изделий нового (третьего) поколения для минометов и САУ на первый план выдвигалась задача разработки материала, который обладал бы комплексом физико-химических, механических, баллистических и эксплуатационных свойств, которые одновременно присущи и конструкционному материалу и пороху.

К такому сгорающему изделию были выдвинуты следующие:

- должен закономерно гореть при выстреле, без несгоревших остатков;
- не должен ухудшать баллистические характеристики порохового заряда;
- сохранять стабильность свойств при длительном хранении (10–15 лет);
- изготавливаться из доступного отечественного сырья.

Кроме того, для современных минометных боеприпасов вместо переменного и дальнобойного зарядов разрабатываются единый полный переменный метательный заряд (ЕППЗ). Он представляет собой конструкцию, в которой объединены дальнобойный и переменный заряды. А для артиллерийских выстрелов – модульный метательный заряд (ММЗ) в жестких сгорающих картузах (ЖСК). В связи с новыми разработками ММЗ появилось еще одно особое требование для артиллерийских выстрелов. Для обеспечения безопасности нахождения ММЗ в сильно разогретом канале ствола САУ необходима повышенная термостойкость материала и сниженная чувствительность к механическим воздействиям. ЖСК должен быть термически стабильным и не воспламеняться в камере в течение 5–12 мин при температуре не ниже 240°C.

На базе исследований ФКП «ГосНИИХП» были разработаны несколько составов сгорающих материалов для ЖСК по технологии фильтрационного литья и пневмоформования. ЖСК – высококачественные конструкционные изделия специального назначения, которые относятся к классу полностью сгорающих гильз, но отличаются от них формой матрицы, рецептурным составом материала и поэтому выделены в отдельную подгруппу. Это обусловлено особенностями минометных и артиллерийских систем, в которых они применяются.

Для опережающего развития боеприпасной отрасли предполагается создание сгорающих изделий ЖСК, которые позволяют более гибко управлять механизмом горения. При этом только за счет корректировки рецептуры сгорающего материала ЖСК не всегда удастся обеспечить требуемый закон горения. Ключевым вопросом в этом отношении является модификация сгорающего изделия для управления механизмом горения по следующим направлениям:

- варьирование плотностью материала сгорающего изделия;
- использование специальной формы с распадающейся боковой поверхностью сгорающего изделия;
- покрытие поверхности защитными составами;
- введение в состав термостойких веществ для обеспечения безопасности ММЗ в условиях боя;
- введение в состав катализаторов горения.

Варьирование плотностью обеспечивается за счет разной толщины материала боковой и донной частей корпуса сгорающего изделия в ЖСК. Так, по технологии фильтрационного литья путем увеличения отверстий на дне формирующей матрицы, возможно увеличивать плотность материала ЖСК после термопрессования до 0,05–0,45 г/см³ и увеличивать время задержки воспламенения на 0,015–0,018 с.

Модификация формы ММЗ. В связи с тем, что материал ЖСК является энергетическим, то в процессе выстрела модульными МЗ при сгорании ЖСК в камере орудия дополнительно повышается давление пороховых газов. При этом распад ЖСК при горении носит неконтролируемый характер. Создание ЖСК с вертикальными полосами меньшей плотности (на 0,20–0,25 г/см³), чем основной

материал ($0,90\text{--}0,95\text{ г/см}^3$) на боковой поверхности, позволяет прогнозировать характер горения в камере орудия путем закономерного распада боковых частей сгорающего изделия.

Защитный состав. МЗ, который помещается в ЖСК, изготавливается из баллиститных порохов с высоким содержанием нитроглицерина. Поскольку нитроэфиры физико-химически слабо связаны с полимерными молекулами нитратов целлюлозы, то в процессе хранения они эксудировать на поверхность пороха и далее диффундируют в материал ЖСК, изменяя его характер горения. В России данный процесс корректируется путем обкладки основного МЗ пироксилиновым порошком по периферийной части для предотвращения соприкосновения баллиститного пороха с материалом сгорающего изделия, или замены баллиститного пороха на высокоэнергетический пироксилиновый. В рамках данной работы показан иной метод, связанный с нанесением защитного состава на поверхность сгорающего изделия. Установлена эффективность эпоксидного лака ЭП-5123 и поливинилбутирала (ПВБ) в качестве барьерного покрытия ЖСК для снижения протекания диффузионных процессов. Показано влияние защитных составов на задержку воспламенения материала сгорающего изделия.

Термостойкий состав сгорающего изделия. В штатный состав ЖСК для артиллерийских выстрелов, изготовленного по технологии фильтрационного литья, входит НЦ с температурой разложения 186°C , его термическая стабильность не обеспечивает выполнение новых требований по термостойкости при 240°C . Как показали проведенные в «ГосНИИХП» исследования при 160°C из материала ЖСК начинает испаряться тротил, полная потеря его массы происходит при 200°C . Испарение тротила из материала СИ сопровождается снижением его плотности с $0,95$ до $0,70\text{ г/см}^3$ и, как следствие, падением прочности до 10 МПа . Наиболее реальным путем выхода из создавшейся ситуации может быть применение энергетических компонентов с более высокой температурой разложения. В ФКП «ГосНИИХП» изготовлены и исследованы опытные образцы сгорающего материала для ЖСК повышенной термостойкости на основе октогена и гексогена, исследована их термостабильность и характер горения. Также предлагаются методы изготовления термостойких ЖСК двухслойной конструкции, позволяющие регулировать скорость горения и задержку воспламенения.

В данной статье будут представлены различные методы управления процессом горения сгорающих изделий, результаты проведенных исследований и описание найденных закономерностей.

CONTROL OF THE COMBUSTION PROCESS OF COMBUSTIBLE PRODUCT FOR MORTAR AND ARTILLERY SHOTS IN COMBUSTIBLE CARTRIDGE CASES

R. V. Fataliev, S. V. Soldatov, A. Yu. Osipova, T. A. Eneikina, R. F. Gatin, M. Yu. Mikhailov

Research Institute of Chemical Products Federal State Enterprise, Kazan, Russia

When creating combustible products of a new (third) generation for mortars and self-propelled artillery mount, the task of developing a material that would have a complex of physicochemical, mechanical, ballistic and operational properties that are simultaneously inherent in both structural material and gunpowder was put forward.

The following have been put forward for such a burning product:

- should burn regularly when fired, without unburned particles;
- should not impair the ballistic characteristics of the powder charge;
- maintain the stability of properties during long-term storage (10–15 years);
- be made from available domestic raw materials.

In addition, for modern mortar ammunition, instead of variable and long-range charges, a single full variable propellant charge is being developed. It is a design that combines long-range and variable charges. And for artillery shots, a modular propellant charge (MPC) in combustible cartridge cases (CCC). In connection with the new developments of the MPC, another special requirement for artillery shots has appeared. To ensure the safety of the location of the MPC in a highly heated bore of the self-propelled artillery mount, an increased thermal stability of the material and reduced sensitivity to mechanical stress are required. must be thermally stable and not ignite in the chamber for 5–12 minutes at a temperature not lower than 240°C .

On the basis of research by Research Institute of Chemical Products Federal State Enterprise (RICP FSE), several compositions of combustible materials for CCC were developed using the technology of filtration casting and pneumatic molding. CCC – high-quality structural products for special purposes, which belong to the class of completely combustible sleeves, but differ from them in the shape of the matrix, the recipe composition of the material and therefore are separated into a separate subgroup. This is due to the peculiarities of the mortar and artillery systems in which they are used.

For the advanced development of the ammunition industry, it is planned to create combustible CCC products, which allow more flexible control of the combustion mechanism. At the same time, it is not always possible to ensure the required combustion law only by adjusting the formulation of the burning material. The key issue in this regard is the modification of the combustible product to control the combustion mechanism in the following areas:

- variation in the density of the material of the burning product;
- use of a special form with a decaying side surface of a burning product;
- surface coating with protective compounds;
- introduction of heat-resistant substances into the composition to ensure the safety of MPC in combat conditions;
- introduction into the composition of combustion catalysts.

Density variation is provided due to the different thickness of the material of the side and bottom parts of the body of the burning product in the housing cooperative. So, according to the technology of filtration casting, by increasing the holes at the bottom of the forming die, it is possible to increase the density of the ZhSK material after thermal pressing to 0.05–0.45 g/cm³ and increase the ignition delay time by 0.015–0.018 s.

Modification of the MPC form. Due to the fact that the CCC material is an energy one, in the process of firing with MPC, when the CCC is burned in the gun chamber, the pressure of the powder gases additionally increases. In this case, the decomposition of CCC during combustion is uncontrolled. Creation of CCC with vertical stripes of lower density (by 0.20–0.25 g/cm³) than the main material (0.90–0.95 g/cm³) on the lateral surface makes it possible to predict the nature of combustion in the gun chamber by regular decay of the side parts of the burning product.

Protective composition. MPC, which is placed in the CCC, is made from ballistic powders with a high content of nitroglycerin. Since nitroesters are physically and chemically weakly bound to the polymeric molecules of cellulose nitrates, during storage they exude onto the surface of the powder and then diffuse into the material of the FGC, changing its combustion character. In Russia, this process is corrected by lining the main MH with pyroxylin powder along the peripheral part to prevent contact of ballistic powder with the material of the burning product, or replacing ballistic powder with high-energy pyroxylin powder. Within the framework of this work, another method is shown related to the application of a protective composition to the surface of a burning product. Efficiency of EP-5123 epoxy varnish and polyvinyl butyral (PVB) as a barrier coating for CCC to reduce diffusion processes has been established. The effect of protective compositions on the ignition delay of the material of a burning product is shown.

Heat-resistant composition of the burning product. The regular composition of the LCC for artillery shots, manufactured using the filtration casting technology, includes NC with a decomposition temperature of 186°C, its thermal stability does not ensure the fulfillment of new requirements for heat resistance at 240°C. As shown by studies carried out at RICP FSE, at 160°C, TNT begins to evaporate from the CCC material, and its complete loss of mass occurs at 200°C. The evaporation of TNT from the SI material is accompanied by a decrease in its density from 0.95 to 0.70 g/cm³ and, as a consequence, a drop in strength to 10 MPa. The most realistic way out of this situation may be the use of energy components with a higher decomposition temperature. In RICP FSE prototypes of lubricants for CCC with increased thermal stability based on HMX and RDX were manufactured and studied, their thermal stability and combustion character were studied. Methods are also proposed for the manufacture of heat-resistant CCC of a two-layer structure, which allow one to control the burning rate and ignition delay.

This article will present various methods for controlling the combustion process of burning products, the results of the research and a description of the patterns found.

2-54

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ МЕМБРАННЫМ КРЕШЕРОМ

К. В. Хаиртденов, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин, И. Г. Галиуллин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

В работе представлены результаты исследований воздействия ударной волны, образованной при детонации образцов бризантных взрывчатых веществ (ВВ), на мембранный крешер. Мембранным крешером называется прибор, применяемый для измерения давления или импульса давления в ударной волне, распространяющейся от места взрыва заряда ВВ. Основной частью прибора является тонкая свинцовая пластина (мембрана), зажатая по периферии в специальном держателе. При установке мембранного крешера на пути распространения ударной волны пластина под действием повышенного давления во фронте волны прогибается и по величине ее прогиба можно судить о величине давления или импульса давления, приложенного к пластине.

Исследования проводились на цилиндрических образцах ВВ различной массы и размеров. Факт воздействия ударной волны на мембранный крешер подтверждался прогибом пластины.

По результатам исследований были получены величины прогиба свинцовой пластины, которые в зависимости от величин, характеризующих мембранный крешер (прочность материала, размеры мембраны и др.), были пересчитаны в давление (импульс давления).

SHOCK-WAVE PRESSURE AND PRESSURE PULSE MEASUREMENTS USING A MEMBRANE CRUSHER

K. V. Khairtdenov, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, K. M. Prosvirnin, I. G. Galiullin

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

The paper presents the results of studying how a shock wave generated under the high-explosive (HE) samples detonation affects a membrane crusher. The membrane crusher is a device used to measure the pressure and pressure pulse in a shock wave propagating from a point where HE charge was exploded. A thin lead plate, or a membrane, fixed around its periphery using special holder represents the main element of this device. If the membrane crusher is placed in a shock-wave path, the plate is deflected under the shock-wave front overpressure, and the amount of deflection can help find the pressure and the pressure pulse applied to the plate.

Cylindrical HE samples of different masses and sizes were used for the study. The shock-wave action on the membrane crusher was evidenced by plate deflection.

Based on the results of this study, the lead plate deflection values were determined and converted into the pressure/pressure pulse values, depending on the values that characterize the membrane crusher, i.e., material strength, size of a membrane, etc.

2-55

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ГЕКСОГЕНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНСТРУКЦИИ ЗАЩИТНОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ УНИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Д. И. Алексеев, М. В. Манзук, А. Н. Паученко, В. В. Харченко

Акционерное общество «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: v.v.harchenko@mail.ru

Отличительной особенностью выключателя постоянного тока, предназначенного для защиты сверхпроводниковых катушек магнитных систем электрофизических установок (далее – защитный размыкатель), разработанного в АО «НИИЭФА», является использование энергии детонации небольшого количества взрывчатого вещества (гексогена) для приведения в действие и, одновременно, для создания условий, необходимых для эффективного гашения электрической дуги после разрушения токоведущего элемента. Такое совмещение функций заряда взрывчатого вещества достигается за счет конструктивных особенностей коммутирующей части, в которой разрушаемый токоведущий элемент и заряд расположены соосно, а свободный объем заполнен деминерализованной водой под давлением. Снаружи токоведущего элемента установлена система ограничительных колец, соединенных с прочным корпусом, которая позволяет добиться предсказуемого деформирования токоведущего элемента с образованием гарантированных зазоров, которые заполняются деминерализованной водой под давлением, которая обеспечивает охлаждение и гашение электрической дуги.

Защитные размыкатели применяются в системах питания всех современных токамаков со сверхпроводниковой магнитной системой, в частности, защитный размыкатель, рассматриваемый в данной работе, установлен в устройствах аварийного (защитного) вывода энергии токамаков ИТЭР, JT-60SA и KSTAR. Следует отметить, что сбой в процессе вывода энергии может вызвать необратимые повреждения не только сверхпроводниковых катушек, но и вакуумной камеры токамака, что равносильно выводу из строя всей дорогостоящей установки. Поэтому к надежности устройств вывода энергии предъявляются очень высокие требования (вероятность безотказного срабатывания – 0,99, при доверительной вероятности 0,9).

Конструкция защитного размыкателя защищена патентом РФ № 2755454.

Статья посвящена изучению влияния детонационных процессов на разрушение токоведущих элементов с целью последующей оптимизации их конструкции, что необходимо для дальнейшего развития и расширения областей применения таких коммутационных устройств, поскольку выключатели подобной конструкции могут найти широкое применение в традиционной энергетике в качестве ограничителей тока короткого замыкания, способных ограничивать ток короткого замыкания в течение 1 мс после обнаружения неисправности. На решение этой задачи в ближайшее время будут направлены основные усилия авторов.

В ходе работы уточнены значения давлений и усилий, возникающих от продуктов взрыва (ПВ) в воздушной и водной среде для оптимизации разрушаемых взрывом элементов конструкции, а также определения коэффициентов запаса по импульсному взрывному нагружению, необходимых для гарантированной работы коммутирующей части.

В работе выполнено расчетно-экспериментальное определение возникающих давлений и усилий, рассчитаны коэффициенты запаса по импульсному взрывному нагружению, включая динамическое разрушение (по теории Мизеса) цилиндрического токоведущего элемента, находящегося в водной среде. Определена скорость разлета капсулы, содержащей заряд гексогена по методу Гарни. Выполнено численное моделирование разрушения токоведущего элемента [1–7].

Кроме того, проведены прямые измерения давлений от ПВ в водной среде на внутренней границе токоведущего элемента при взрыве 1 грамма гексогена. Выполнен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с результатами расчетов значений давлений по методу Нобля–Абеля с затуханием давлений в цилиндрической геометрии [6]. Определена скорость деформации разрушаемого токоведущего элемента по методике Покровского [7].

Литература

1. **Котомин, А. А.** Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций [Текст] / А. А. Котомин, С. А. Душенок, А. С. Козлов. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 384с.
2. **Забабахин, Е. И.** Явления неограниченной кумуляции [Текст] / Е. И. Забабахин, И. Е. Забабахин. – М. : Наука, 1988. – 163с.
3. **Забабахин, Е. И.** Кумуляция и неустойчивость [Текст]. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 1998.
4. **Дерибас, А. А.** Метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной [Текст] // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 5.
5. Физика взрыва [Текст] : в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002.
6. **Коул, Р.** Взрывы в воде [Текст]. Пер. с англ. = Cole, R. H. Underwater explosions. 1948. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1950. – 496 с.
7. **Покровский, Г. И.** Взрыв [Текст]. 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1980. – 190 с.

DESIGN-EXPERIMENT DETERMINATION OF THE PRESSURE OF HEXOGEN EXPLOSION PRODUCTS AS APPLIED TO THE DESIGN OF THE PROTECTIVE MAKE SWITCH OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF UNIQUE ELECTROPHYSICAL INSTALLATIONS

D. I. Alekseev, M. V. Manzuk, A. N. Pauchenko, V. V. Kharchenko

Joint Stock Company “D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus”, St. Petersburg, Russia

E-mail: v.v.harchenko@mail.ru

A distinguishing feature of the DC circuit breaker used to protect superconducting coils of magnetic systems of electrophysical installations (hereinafter – protective make switch), developed in JSC “NIEFA”, is the use of detonation energy of a small amount of explosive (hexogen) to actuate and, at the same time, to create the conditions necessary for effective arc-quenching after the failure of the current-carrying element. This combination of explosive charge functions is achieved due to the design features of the switching part, in which the destructible current-carrying element and the charge are located coaxially, and the free volume is filled with demineralized water under pressure. On the outside of the current-carrying element there is a system of stopper rings connected to a solid body, which allows a predictable deformation of the current-carrying element with the formation of guaranteed gaps, which are filled with demineralized water under pressure, providing cooling and arc-quenching.

Protective make switches are used in the power systems of all modern tokamaks with a superconducting magnetic system, in particular, the protective make switch considered in this work is installed in Fast Discharge Units of ITER, JT-60SA and KSTAR tokamaks. It should be pointed out that a failure in the energy output process can cause irreversible damage not only to the superconductor coils, but also to the vacuum chamber of the tokamak, which is equivalent to the failure of the entire expensive installation. Therefore, very high requirements are imposed on the FDUs reliability (the component reliability is 0.99 with a confidence probability of 0.9).

The design of the protective make switch is protected by RF patent No. 2755454.

The article is devoted to the study of the detonation processes influence on the destruction of current-carrying elements for subsequent optimization of their design, which is necessary for further development

and expansion of applications of such switching devices, because switches of such design may find wide application in conventional power industry as fault current limiters capable of limiting the circuit within 1 ms after detection of a fault. The main efforts of the authors will be directed to the solution of this problem in the near future.

During this work, the values of pressures and forces arising from explosion products in the air and water environment were specified to optimize the elements of the structure destroyed by explosion, as well as to determine the reserve coefficients on the impulse explosion loading required for the guaranteed operation of the switching part.

In this work, the design-experiment determination of the arising pressures and forces is performed, and the reserve coefficients for impulse explosive loading, including dynamic destruction (according to von Mises' theory) of a cylindrical current-carrying element located in water environment are calculated. The expansion velocity of a capsule containing a hexogen charge was determined using the Gurney method. Numerical simulation of current-carrying element failure was performed [1–7].

In addition, direct measurements of pressures from explosion products in the water environment at the inner boundary of the current-carrying element during the explosion of 1 gram of hexogen were made. A comparative analysis of the experimental data obtained with the results of calculations of pressure values by the Noble-Abel method with pressure damping in the cylindrical geometry [6] was performed. The deformation rate of the destructible current-carrying element was determined by the Pokrovsky method [7].

References

1. **Котомин, А. А.** Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций [Текст] / А. А. Котомин, С. А. Душенок, А. С. Козлов. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 384с.
2. **Забабахин, Е. И.** Явления неограниченной кумуляции [Текст] / Е. И. Забабахин, И. Е. Забабахин. – М. : Наука, 1988. – 163с.
3. **Забабахин, Е. И.** Кумуляция и неустойчивость [Текст]. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 1998.
4. **Дерibas, А. А.** Метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной [Текст] // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 5.
5. Физика взрыва [Текст] : в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002.
6. **Коул, Р.** Взрывы в воде [Текст]. Пер. с англ. = Cole, R. H. Underwater explosions. 1948. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1950. – 496 с.
7. **Покровский, Г. И.** Взрыв [Текст]. 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1980. – 190 с.

2-56

РЕГИСТРАЦИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИМ И МИКРОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ

Н. А. Хлебановский¹, А. О. Кашкаров², К. А. Тэн², Е. Ю. Герасимов³, Б. Л. Мороз³

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

³Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

В данной работе приводятся результаты опытов по детонационному синтезу наночастиц металлов и их исследований рентгенографическим методом и методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Оксалаты железа и меди равномерно смешивались с порошком штатного тэна и затем изготавливались прессованные заряды. Соединения металлов в ходе термического

разложения за детонационным фронтом являлись источниками свободных атомов металлов и их оксидов. В последствии, из них формировались наночастицы, предположительно по диффузионному механизму [1].

После детонации морфология продуктов взрыва и содержащихся в них наночастиц металлов может значительно меняться, например при их соударении о стенки взрывной камеры. Для минимизации влияния условий опытов заряды помещались в ледяные оболочки. Сохраненные продукты детонации зарядов с разным процентным содержанием металлов, исследовались на просвечивающем электронном микроскопе.

Процесс формирования наночастиц металлов за фронтом детонации регистрировался при помощи динамической регистрации малоуглового рентгеновского рассеяния синхротронного излучения. Эта методика позволяет проводить измерения непосредственно во время взрыва и исследовать динамику зарождения и роста наночастиц металлов с временным разрешением около 200 нс [2].

Полученные результаты по синтезу наночастиц в процессе взрыва могут быть использованы в качестве дополнительной верификации алгоритмов восстановления размеров рассеивающих центров методики динамической регистрации малоуглового рентгеновского рассеяния.

Литература

1. Толочко, Б. П. Физико-химическая модель детонационного синтеза наночастиц из карбоксилатов металлов [Текст] / Б. П. Толочко, А. П. Чернышев, К. А. Тен и др. // Физика металлов и металловедение. – 2008. – Т. 105, № 2. – С. 145–151.
2. Тэн, К. А. Исследование быстропротекающих процессов рентгенодифракционными методами в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения [Текст] / К. А. Тэн, Б. П. Толочко, Л. И. Шехтман и др. // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188, № 6. – С. 577–593.

REGISTRATION OF DETONATION SYNTHESIS OF METAL NANOPARTICLES BY X-RAY AND MICROSCOPIC METHODS

N. A. Khlebanovsky¹, A. O. Kashkarov², K. A. Ten², E. Y. Gerasimov³, B. L. Moroz³

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Boreskov Institute of Catalysis, SB RAS, Novosibirsk, Russia

This paper presents the results of experiments on the detonation synthesis of metal nanoparticles and their studies by X-ray diffraction and high-resolution transmission electron microscopy. Iron and copper oxalates were evenly mixed with standard heating element powder and then pressed charges were made. Metal compounds in the course of thermal decomposition behind the detonation front were sources of free metal atoms and their oxides. Subsequently, nanoparticles were formed from them, presumably by the diffusion mechanism [1].

After detonation, the morphology of the explosion products and metal nanoparticles contained in them can change significantly, for example, when they collide with the walls of the explosion chamber. To minimize the influence of experimental conditions, the charges were placed in ice shells. The stored detonation products of charges with different percentages of metals were examined using a transmission electron microscope.

The process of formation of metal nanoparticles behind the detonation front was recorded using dynamic registration of small-angle X-ray scattering of synchrotron radiation. This technique makes it possible to carry out measurements directly during the explosion and to study the dynamics of the nucleation and growth of metal nanoparticles with a time resolution of about 200 ns [2].

The results obtained on the synthesis of nanoparticles during the explosion can be used as an additional verification of the algorithms for reconstructing the sizes of scattering centers of the technique for dynamic detection of small-angle X-ray scattering.

References

1. **Tolochko, B. P.** Physicochemical model of detonation synthesis of nanoparticles from metal carboxylates [Text] / B. P. Tolochko, A. P. Chernyshev, K. A. Ten et al. // Physics of Metals and Metal Science. – 2008. – Т. 105, No. 2. – P. 145–151.
2. **Ten, K. A.** Investigation of fast processes by X-ray diffraction methods at the Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation [Text] / K. A. Ten, B. P. Tolochko, L. I. Shekhtman et al. // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. – 2018. – Т. 188, No. 6. – P. 577–593.

2-57

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ НА ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОРОД-КИСЛОРОДНЫХ СМЕСЕЙ

Т. А. Хмель

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

Методами численного моделирования одномерных и двумерных течений исследованы процессы детонации в водород-кислородных смесях, разбавленных аргоном или азотом с добавками мелкодисперсных частиц алюминия (диаметром от 1 до 5 мкм). Используются подходы механики сплошных сред и модели приведенной кинетики горения водорода [1] и алюминия [2], верифицированные по совокупности параметров. В описании детонационного горения алюминия учитывается образование твердых наночастиц оксида алюминия и газообразных субокислов. Для замыкания модели привлекаются известные данные экспериментов и термодинамических расчетов. Рассмотрены задачи о формировании и распространении ячеистой детонации в плоских каналах. В водород-кислородных смесях с избытком кислорода, сильно разбавленных аргоном, детонация характеризуется продольной неустойчивостью плоских волн и нерегулярностью детонационных ячеек. Добавка небольшого количества частиц алюминия обеспечивает стабилизацию детонационного течения и формированию регулярных ячеистых структур. Переход к установившемуся режиму гибридной детонации происходит через формирование промежуточных двух-фронтных структур [3, 4], которые здесь не являются стационарными. При сближении и слиянии фронтов формируется новая квазистационарная структура гибридной детонации. Размеры детонационных ячеек в установившихся режимах гибридной детонации меньше, чем средний размер ячейки детонации в газовой смеси (рис. 1). Скорость детонации увеличивается с увеличением загрузки частиц до некоторого предела, определяемого концентрацией свободного кислорода.

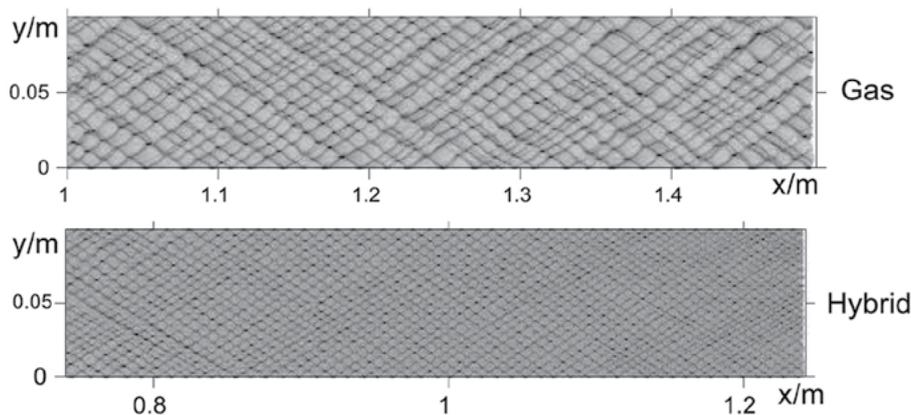


Рис. 1. Траектории тройных точек в установившемся режиме детонации газовой смеси $0,72\text{H}_2 + \text{O}_2 + 2,58\text{Ar}$ ($p_0 = 1$ атм) и гибридной смеси с добавками частиц Al при $d = 3,5$ мкм, $\rho_{20} = 50$ г/м³

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>.

Литература

1. **Bedarev, I.** Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen-oxygen mixture by a high velocity projectile [Text] / I. Bedarev, V. Temerbekov // *Thermal Science*. – 2021. – Vol. 25. – P. 3889–3897.
2. **Khmel, T. A.** Detonation flows in aluminium particle gas suspensions, inhomogeneous in concentrations [Text] / T. A. Khmel, S. A. Lavruk // *J. Loss Prev. Process Ind.* Elsevier Ltd. – 2021. – Vol. 72. – P. 104522.
3. **Veysière, B.** Structure and multiplicity of detonation regimes in heterogeneous hybrid mixtures [Text] / B. Veysière, B. A. Khasainov // *Shock Waves*. – 1995. – Vol. 4. – P. 171–186.
4. **Veysière, B.** Existence of the detonation cellular structure in two-phase hybrid mixtures [Text] / B. Veysière, W. Ingignoli // *Shock Waves*. – 2003. – Vol. 12. – P. 291–299.

EFFECT OF ADDITIVE ALUMINUM PARTICLES ON THE DETONATION CHARACTERISTICS OF HYDROGEN-OXYGEN MIXTURES

T. A. Khmel

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SD RAS, Novosibirsk, Russia

The processes of detonation in hydrogen-oxygen mixtures diluted with argon or nitrogen with the addition of finely dispersed aluminum particles (with a diameter of 1 μm to 5 μm) have been studied by methods of numerical simulation of one-dimensional and two-dimensional flows. The approaches of continuum mechanics and models of the reduced kinetics of hydrogen [1] and aluminum [2] combustion, verified by a set of parameters, are used. The description of aluminum detonation combustion takes into account the formation of solid aluminum oxide nanoparticles and gaseous suboxides. To close the model, the known data of experiments and thermodynamic calculations are involved. The problems of formation and propagation of cellular detonation in flat channels are considered. In hydrogen-oxygen mixtures with an excess of oxygen, strongly diluted with argon, detonation is characterized by longitudinal instability and irregularity of detonation cells. The addition of a small amount of aluminum particles ensures the stabilization of the detonation flow and the formation of regular cellular structures. The transition to the steady regime of hybrid detonation occurs through the formation of intermediate double-front structures [3, 4], which are not stationary here. As the fronts approach and merge, a new quasi-stationary structure of hybrid detonation is formed. The sizes of detonation cells in the steady modes of hybrid detonation are smaller than the average size of a detonation cell in a gas mixture (fig. 1). The detonation velocity increases with increasing particle load up to a certain limit determined by the concentration of free oxygen.

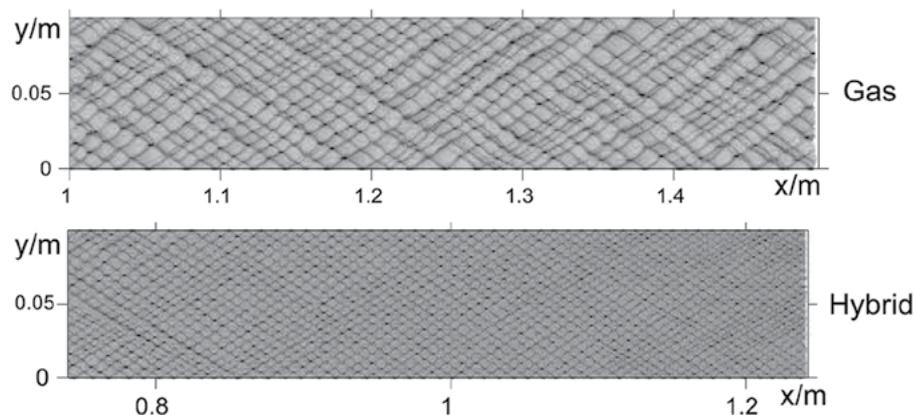


Fig. 1. Trajectories of the triple points in the steady detonation regime in gas mixture $0.36\text{H}_2 + \text{O}_2 + 2.58\text{Ar}$ at $p_0 = 1$ atm and hybrid mixture with addition of Al particles: $d = 3.5 \mu\text{m}$, $\rho_{20} = 50 \text{ g/m}^3$

The work is supported by Russian Scientific Fund, project 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>.

References

1. **Bedarev, I.** Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen-oxygen mixture by a high velocity projectile [Text] / I. Bedarev, V. Temerbekov // *Thermal Science*. – 2021. – Vol. 25. – P. 3889–3897.
2. **Khmel, T. A.** Detonation flows in aluminium particle gas suspensions, inhomogeneous in concentrations [Text] / T. A. Khmel, S. A. Lavruk // *J. Loss Prev. Process Ind.* Elsevier Ltd. – 2021. – Vol. 72. – P. 104522.
3. **Veysière, B.** Structure and multiplicity of detonation regimes in heterogeneous hybrid mixtures [Text] / B. Veysière, B. A. Khasainov // *Shock Waves*. – 1995. – Vol. 4. – P. 171–186.
4. **Veysière, B.** Existence of the detonation cellular structure in two-phase hybrid mixtures [Text] / B. Veysière, W. Ingignoli // *Shock Waves*. – 2003. – Vol. 12. – P. 291–299.

2-58

НОВЫЕ ДИФТОРАМИНСОДЕРЖАЩИЕ ПРОИЗВОДНЫЕ ФУРАЗАНА: СИНТЕЗ И ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

*Д. Л. Чижов¹, Ю. А. Квашин¹, А. В. Станкевич², П. А. Слепухин¹,
Г. Л. Русинов¹, В. Н. Чарушин¹*

¹Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Фуразаны (1,2,5-оксадиазолы) относятся к высокоэнтальпийным азотсодержащим гетероциклам. Ряд соединений, содержащие фуразановые фрагменты, особенно в сочетании с другими эксплозифорными группами (нитро-, азо-, азокси- и др.), зарекомендовали себя как перспективные высокоэнергетические соединения с пониженной чувствительностью. С другой стороны, одним из путей повышения энергетических параметров (особенно в случае топливных композиций) могла бы стать замена нитрогруппы на дифтораминную, что частично подтверждается расчетными энергетическими параметрами для ряда дифтораминозамещенных фуразановых производных [1]. Однако, на настоящий момент, в литературе есть только одна публикация по синтезу арилфуразанов, содержащих одну дифтораминную группу [2].

С целью получения новых энергонасыщенных соединений проведено фторирование ряда аминозамещенных фуразанов – 3,4-диаминофуразана, 4,4'-диаминоазофуразана и 4,4'-диаминоазоксифуразана. В результате, при использовании в качестве фторирующего агента элементарного фтора, разбавленного инертным газом, были впервые получены 4,4'-бис(дифторамино)азофуразан 1 и 4,4'-бис(дифторамино)азоксифуразан 2 (рис. 1). Структуры полученных соединений подтверждены данными ЯМР-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа.

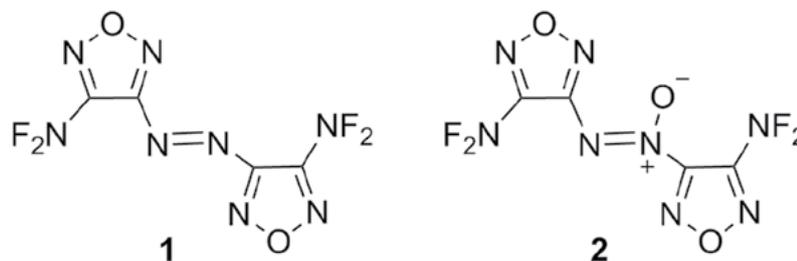


Рис. 1. Структуры дифтораминсодержащих производных фуразана 1 и 2

Проведен анализ энергетических свойств как синтезированных 4,4'-бис(дифторамино) азофуразана 1 и 4,4'-бис(дифторамино)азоксифуразана 2, так и исходных 4,4'-диамино азофуразана и 4,4'-диаминоазоксифуразана. Исследования проводились теоретическими методами классической термодинамики, а также первопринципными полуэмпирическими методами квантовой химии. При этом было показано, что рассматриваемый класс дифтораминосодержащих энергетических материалов имеет массовую теплоту взрывчатого превращения и объем газовой фазы сопоставимые с ТНТ и гексогеном. Оценочные значения скоростей детонации для 4,4'-бис(дифторамино) азоксифуразана превосходят октоген на 10% и С1-20 на 3%.

Литература

1. **Zhang, X.** Comparative Theoretical Studies of Energetic Substituted Carbon- and Nitrogen-Bridged Difurazans [Text] / X. Zhang, W. Zhu, H. Xiao // J. Phys.Chem. A. – 2010. – Vol. 114. – P. 603–612.
2. **Фокин, А. В.** Реакция 3-аминофуразанов с элементарным фтором [Текст] / А. В. Фокин, И. В. Зелинский, С. Ф. Мельникова, С. Н. Вергизов, Ю. Н. Студнев, В. Р. Столяров, С. С. Ильин // Изв. АН ССР. Серия хим. – 1986. – С. 2086–2088.

NEW DIFLUORAMIN-CONTAINING FURAZAN DERIVATIVES: SYNTHESIS AND EVALUATION OF ENERGY PROPERTIES

*D. L. Chizhov¹, Yu. A. Kvashnin¹, A. V. Stankevich², P. A. Slepukhin¹,
G. L. Rusinov¹, V. N. Charushin¹*

¹Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

²Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin Алд – Russia Research Institute of technical Physics

Furazans (1,2,5-oxadiazoles) are high-enthalpy nitrogen-containing heterocycles. A number of compounds with furazan fragments, especially in combination with other explosives groups (nitro-, azo-, azoxy-, etc.), have proven to be promising high-energy compounds with reduced sensitivity. On the other hand, replacement of the nitro group by the difluoroamine group in an energy compound could be considered as one of the ways to increase the energy parameters (especially in the case of fuel compositions). This has been partially confirmed by the calculated energy parameters for a number of difluoroamino-substituted furazan derivatives [1]. However, to the best of our knowledge, there is only one report in the literature on the synthesis of arylfurazans containing one difluoroamine group [2].

In order to obtain new energy-saturated compounds fluorination of a number of amino-substituted furazans (3,4-diaminofurazan, 4,4'-diaminoazofurazan and 4,4'-diaminoazoxyfurazan) was carried out. As a result, 4,4'-bis(difluoroamino)azofurazan 1 and 4,4'-bis(difluoroamino)azoxyfurazan 2 were obtained for the first time using elemental fluorine diluted with an inert gas as a fluorinating agent (fig. 1). The structures of the obtained compounds were confirmed by the NMR spectroscopy and the single crystal X-ray analysis.

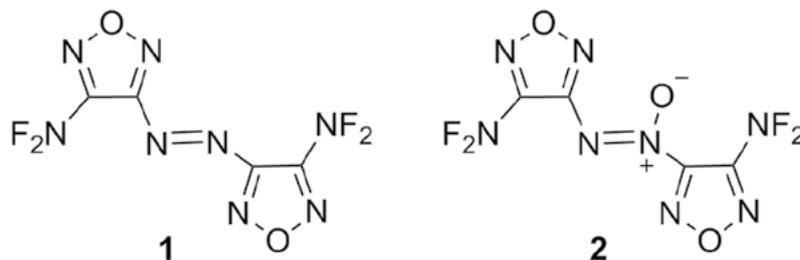


Fig. 1. Structures of difluoroamine-containing furazan derivatives 1 and 2

The energy properties of both the synthesized 4,4'-bis(difluoroamino)azofurazan 1 and 4,4'-bis(difluoroamino)azoxyfurazan 2, and the starting 4,4'-diaminoazofurazan and 4,4'-diaminoazoxyfurazan were

analyzed. Theoretical methods of classical thermodynamics, as well as first-principles semi-empirical methods of quantum chemistry were used in this study. It was shown that this class of difluoroamine-containing energy materials has a mass heat of explosive transformation and a volume of the gas phase that are comparable to TNT and RDX. Estimated detonation velocities for 4,4'-bis(difluoroamino)azoxyfurazan exceed HMX by 10% and CI-20 by 3%.

References

1. **Zhang, X.** Comparative Theoretical Studies of Energetic Substituted Carbon- and Nitrogen-Bridged Difurazans [Text] / X. Zhang, W. Zhu, H. Xiao // J. Phys.Chem. A. – 2010. – Vol. 114. – P. 603–612.
2. **Fokin, A. V.** Reaction of 3-amtnofurazans with elemental fluorine [Text] / A. V. Fokin, I. V. Tselinskii, S. F. Mel'nikova, S. N. Vergizov, Yu. N. Studnev, V. P. Stolyarov, S. S. Il'in // Russ. Chem. Bull. – 1986. – Vol. 35. – P. 1901–1903. <https://doi.org/10.1007/BF00954028>

2-59

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ ТОНКИХ СЛОЕВ ПЛАСТИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

*С. В. Шахмаев, Д. М. Гагаркин, К. В. Еганов, А. В. Клепинин, Р. Н. Латыпов,
А. В. Сарафанников, Е. Б. Смирнов*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Пластичные взрывчатые вещества (ПВВ) с малым значением критического диаметра детонации широко применяются в качестве трансляторов детонационного импульса в элементах детонационной логики, а также в составе различных нагружающих устройств. Так, ленты и перфоленты из пластичных ВВ могут использоваться в качестве составной части системы имитации механического импульса [1].

Известные способы имитации механического импульса методом взрыва напыленного взрывчатого вещества на поверхность испытываемого изделия [2], а также методом электрического взрыва проводника [3] сопряжено со значительными техническими трудностям и необходимостью использования технологически сложного оборудования. При этом ленты и перфоленты из ВВ с малым значением критического диаметра лишены указанных недостатков.

Для получения данных о детонационных параметрах тонких слоев ПВВ были проведены эксперименты с определением скорости детонации, а также критического и предельного диаметров детонации лент различной толщины.

Было показано, что значение критического диаметра лент из ПВВ на основе флегматизированного ТЭНа [4] составляет менее 0,20 мм. При этом при одноточечном инициировании относительная скорость детонации таких лент составила порядка 0,96 от скорости детонации заряда предельного диаметра.

Литература

1. **Герасимов, С. И.** проблеме моделирования механического импульса рентгеновского излучения на крупномасштабные тонкостенные конструкции [Текст] / С. И. Герасимов, В. А. Кузьмин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – № 3. С. 202–208.
2. **Benham, R. A.** Application of light initiated explosive for simulating X-ray blowoff impulse effects on a full scale reentry vehicle [Text] / R. A. Benham, F. H. Mathews // Shock and vibration symposium; Albuquerque, New Mexico, United States of America (USA). SAND–76-9019. – 1976. – P. 47.

3. **Патент 2373637 Российская Федерация, МПК H03K 3/53.** Способ генерирования механического импульса электрическим взрывом проводника [Текст] / Коваленко С. А., Култыгин В. И. и др.; заявитель и патентообладатель ФГУ «12 ЦНИИ Минобороны России». – № 2008123120/28; заяв. 10.06.2008; опубл. 20.11.2009, Бюл. 32. – 6 с.
4. **Патент 2671340 Российская Федерация, МПК C06B 25/32, C06B 46/06.** Пластичный взрывчатый состав [Текст] / Воробьёв М. А., Багаветдинов Н. Г. и др.; заявитель и патентообладатель ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина». – № 2017132608; заяв. 18.09.2017; опубл. 30.10.2018, Бюл. 31. – 5 с.

DETERMINATION OF DETONATION PARAMETERS FOR THIN LAYERS OF PLASTIC HIGH EXPLOSIVES

*S. V. Shakhmaev, D. M. Gagarkin, K. V. Eganov, A. V. Klepinin, R. N. Latypov,
A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov*

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

Plastic high explosives (plastic HEs) with a small critical detonation diameter are widely used as detonation impulse translators in detonation logic elements, as well as in various loading devices. Thus, tapes and perforated tapes made of plastic HEs can be used as an integral part of the mechanical impulse simulation system [1].

The known methods of simulating a mechanical impulse by means of explosion of an HE deposited on the surface of the tested product [2], as well as by means of electrical explosion [3] of a conductor, are associated with significant technical difficulties and the necessity to use technologically sophisticated equipment. At the same time, tapes and perforated tapes made of HEs with a small critical diameter are free from such disadvantages.

To obtain data on the detonation parameters of thin layers of plastic HEs, experiments were carried out to determine the detonation velocity, as well as the critical and extremal detonation diameters of tapes of various thicknesses.

The critical diameter of tapes of plastic HEs based on phlegmatized PETN [4] is shown to be less than 0.20 mm. In this case, the relative detonation velocity of such tapes at single-point initiation was about 0.96 of the detonation velocity of the charge with the extremal diameter.

References

1. **Gerasimov, S. I.** On the problem of modeling a mechanical X-ray impulse on large-scale thin-walled structures [Text] / S. I. Gerasimov, V. A. Kuzmin // Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. – 2014. – No. 3. – P. 202–208.
2. **Benham, R. A.** Application of light initiated explosive for simulating X-ray blowoff impulse effects on a full scale reentry vehicle [Text] / R. A. Benham, F. H. Mathews // Shock and vibration symposium; Albuquerque, New Mexico, United States of America (USA). SAND–76-9019. – 1976. – P. 47.
3. **Patent 2373637 Russian Federation, MPK N03K 3/53.** A method for generating a mechanical impulse by an electrical explosion of a conductor [Text] / Kovalenko S. A., Kultygin V. I. et al.; Applicant-patentee Federal State Institution “The 12th Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia”. – No. 2008123120/28; appl. June 10, 2008, publ. November 20, 2009, Bulletin 32. – 6 p.
4. **Patent 2671340 Russian Federation, MPK C06B 25/32, S06V 46/06.** Plastic explosive composition [Text] / Vorobyov M. A., Bagavetdinov N. G. et al.; Applicant-patentee FSUE “RFNC – VNIITF”. – No. 2017132608; appl. September 18, 2017; publ. October 30, 2018, Bulletin 31. – 5 p.

2-60

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛАХ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ СОСТАВА НА ОСНОВЕ ТЭН

В. Б. Титова, Н. А. Володина, М. О. Ширшова, И. А. Спирин

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров, Россия

В настоящее время в целях совершенствования систем инициирования детонации в экспериментальных сборках, содержащих взрывчатые вещества, ведутся работы по исследованию процессов распространения детонационной волны в каналах, снаряженных ВВ на основе ТЭН (пентаэритрит-тетранитрат) [1].

В данной работе на основе модельных экспериментов, представленных в [1], исследуются подходы численного моделирования распространения детонационной волны в каналах малого сечения с учетом кинетики детонации МК [2].

Литература

1. **Халдеев, Е. В.** Распространение детонации на углах поворота в каналах малого сечения [Текст] / Е. В. Халдеев, А. В. Бессонова, Д. А. Пронин, Ю. М. Сустаева, О. В. Шевлягин // *Физика горения и взрыва*. – 2018. – Т. 54, № 5. – С. 1–6.
2. **Морозов, В. Г.** Теоретическое обоснование феноменологической модели ударноволновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ [Текст] / В. Г. Морозов, И. И. Карпенко, С. Е. Куратов, С. С. Соколов, Б. Н. Шамраев, Л. В. Дмитриева // *Химическая физика*. – 1995. – Т. 14, № 2–3.

CHARACTERISTICS OF DETONATION WAVE'S PROPAGATION IN CHANNELS OF A SMALL CROSS-SECTION FOR PETN-BASED COMPOUND

V. B. Titova, N. A. Volodina, M. O. Shirshova

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics”, Sarov, Russia

Today, the work on studying the detonation wave propagation in channels with PETN-based (pentaerythrite tetranitrate) HE is in progress in order to improve the detonation initiating system in experimental assemblies containing explosives [1].

The report describes studies of the approaches based on the model experiments presented in [1] to the numerical simulation of detonation waves propagating in channels of small cross-sections with account for kinetics using the MK detonation kinetics model [2].

References

1. **Khaldeev, E. V.** Detonation Propagation at Bend Angles in Channels of Small Cross Section [Text] / E. V. Khaldeev, A. V. Bessonov, D. A. Pronin, Ya. A. Sustaeva, O. V. Shevlyagin // *Combustion, Explosives, and Shock Waves*. – 2018. – Vol. 54, No. 5. – P. 264.
2. **Morozov, V. G.** Theory Justifying the Phenomenological Model of Shock Wave Sensivity of TATB-Based HE [Text] / V. G. Morozov, I. I. Karpenko, S. E. Kuratov, S. S. Sokolov, B. N. Shamraev, L. V. Dmitrieva // *Russian Journal of Physical Chemistry*. – 1995. – Vol. 14, No. 1–3. – P. 170.

2-61

РЕГИСТРАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ТАТБ ЧЕРЕЗ ИНЕРТНУЮ ПРЕГРАДУ

*А. А. Студенников^{1,2}, И. А. Рубцов^{1,2}, Э. Р. Прууэл², К. А. Тен², А. О. Кашкаров²,
В. П. Халеменчук², А. К. Музыря³, Е. Б. Смирнов³, К. М. Просвирнин³, И. Г. Галиуллин³,
К. В. Еганов³, А. С. Гремитских³*

¹ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

³ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

В работе представлены результаты динамики фронта волны при инициировании цилиндрических прессованных зарядов из ТАТБ через преграду из полиметилметакрилата (ПММА) различных толщин. Основной целью исследования является определение глубины возникновения интенсивной химической реакции в исследуемом веществе, скорости его фронта и обнаружение переходного процесса инициирования ТАТБ. Регистрация производилась параллельно двумя невозмущающими методиками – синхротронной (СИ) и радиоинтерферометрической методикой исследования быстропротекающих процессов (РИ).

Метод СИ позволяет регистрировать не только ударную и детонационную волну в энергетическом материале, но и состояние вещества за фронтом волны в течении ~10 мкс после ее прохождения. Такая информация позволяет получить данные о наличии и характере химической реакции, иначе говоря зарегистрировать переход ударной волны в детонационную.

Метод РИ позволяет определять временную зависимость движения фронта волны, а частотная характеристика сигнала – характер развития процесса инициирования.

Сравнения экспериментальных данных полученных этими методиками показывают близкие результаты по развитию процесса инициирования и дополняют друг друга по определению скорости фронта, его эволюции и глубины возникновения химической реакции.

SYNCHROTRON RADIATION METHODS FOR REGISTRATION OF TRANSIENT PROCESS OF TATB INITIATION THROUGH AN DENSE BARRIER

*A. A. Studennikov^{1,2}, I. A. Rubtsov^{1,2}, E. R. Pruuel², K. A. Ten², A. O. Kashkarov²,
V. P. Xalemenchuk², A. K. Myzirya³, E. B. Smirnov³, K. M. Prosvirnin³, I. G. Galiullin³,
K. V. Eganov³, A. S. Gremitskich³*

¹Synchrotron radiation facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

³FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

The paper presents the results of the dynamics of the wave front during the initiation of cylindrical pressed charges from TATB through a barrier made of polymethyl methacrylate (PMMA) of various thicknesses. The main purpose of the study is to determine the depth of the occurrence of an intense chemical reaction in the test substance, the speed of its front and the detection of the transient process of TATB initiation. Registration was carried out in parallel by two non-perturbing methods – synchrotron (SR) and radio interferometric methods for studying fast processes (RI).

The SR method makes it possible to register not only the shock and detonation wave in an energetic material, but also the state of matter behind the wave front within ~10 μs after its passage. Such information

makes it possible to obtain data on the presence and nature of a chemical reaction, in other words, to register the transition of a shock wave into a detonation one.

The RI method makes it possible to determine the time dependence of the motion of the wave front, and the frequency response of the signal determines the nature of the development of the initiation process.

Comparisons of the experimental data obtained by these methods show close results on the development of the initiation process and complement each other in determining the front velocity, its evolution, and the depth of the chemical reaction.

2-62

ЭФФЕКТ СЕНСИБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Л. Х. Бадретдинова, Р. М. Вахидов, А. С. Куражов, Д. В. Метляков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия

В работах кафедры ТТХВ выявлен эффект увеличения чувствительности БВВ к удару при одновременном воздействии электрического поля, создаваемого деформируемым пьезоэлектрическим элементом. Воздействие электрического поля на БВВ приводит к повышению чувствительности к удару до уровня первичных ЭНМ. Расчеты показывают, что энергия электрического поля позволяет повысить температуру навески на сотые доли градусов. К тому же, инициирование при электромеханическом воздействии происходит при значительно более низких давлениях, что исключает повышение чувствительности за счет повышения температуры навески ЭНМ. Предполагается, что эффект вызван уменьшением вероятности рекомбинацией ионов и радикал-ионов, образующихся при разрушении кристаллов. Осциллограммы инициирования ЭНМ при ударе без поля, показывают, что горение ЭНМ в приборчике при разгрузке может прерваться и рост давления вызванного разложением происходит на нисходящей ветви кривой нагружения. При электромеханическом воздействии разложение происходит на восходящей кривой нагружения, а рост давления происходит со значительно большей скоростью. Приведенные факты указывают на увеличение скорости горения ЭНМ при электромеханическом воздействии, а скорость химической реакции увеличивается либо при увеличении подвижности, либо увеличении времени жизни, либо концентрации химически активных промежуточных продуктов разложения. Увеличение подвижности ионов и радикал-ионов в кристаллической решетке маловероятно, а увеличение концентрации определяется давлением, оказываемым на ЭНМ. Таким образом, остается только увеличение времени жизни химически активных частиц, т. е. уменьшение вероятности их рекомбинации.

THE EFFECT OF SENSITIZATION OF HIGH-ENERGY COMPOSITIONS UNDER ELECTROMECHANICAL ACTION

L. Kh. Badretdinova, R. M. Vakhidov, A. S. Kurazhov, D. V. Metlyakov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technological University», Kazan, Russia

In the works of the department of solid chemical substance technology, the effect of increasing the sensitivity of high explosives to impact with the simultaneous action of an electric field created by a deformable piezoelectric element was revealed. The impact of an electric field on high explosives leads to an increase in shock sensitivity to the level of primary energy-saturated materials. Calculations show that the energy of the electric field makes it possible to increase the sample temperature by hundredths of a degree.

In addition, initiation under electromechanical action occurs at much lower pressures, which eliminates the increase in sensitivity due to an increase in the temperature of the sample of energy-saturated material. It is assumed that the effect is caused by a decrease in the probability of recombination of ions and radical ions formed during the destruction of crystals. Oscillograms of the initiation of energy-saturated materials upon impact without a field show that the combustion of an energy-saturated material in the device during unloading can be interrupted and the pressure increase caused by decomposition occurs on the descending branch of the loading curve. Under electromechanical action, decomposition occurs on an ascending loading curve, and the pressure rises at a much higher rate. The above facts indicate an increase in the burning rate of an energy-saturated material under electromechanical action, and the rate of a chemical reaction increases either with an increase in mobility, or an increase in the lifetime, or the concentration of chemically active intermediate decomposition products. An increase in the mobility of ions and radical ions in the crystal lattice is unlikely, and the increase in concentration is determined by the pressure exerted on the energy-saturated material. Thus, there remains only an increase in the lifetime of chemically active particles, that is, a decrease in the probability of their recombination.
