

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ УГЛЕРОДА ПРИ ДЕТОНАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

И.А. Рубцов^{1,2}, К.А. Тен¹, Э.Р. Прууэл¹, А.О. Кашкаров¹, А.А. Студенников^{1,2}

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

² ЦКП «СКИФ» Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, р.п. Кольцово

Конденсация углерода при детонации энергетических материалов (ЭМ) с отрицательным кислородным балансом является одним из важных процессов, протекающих в зоне химической реакции и волне Тейлора. Детальное изучение этого процесса необходимо для уточнения уравнений состояния и оптимизации детонационных и метательных свойств ЭМ. В работе представлены параметры кинетики конденсации углерода за зоной химической реакции при детонации ЭМ с отрицательным кислородным балансом.

Ключевые слова: энергетические материалы, детонация, конденсация углерода, малоугловое рентгеновское рассеяние, синхротронное излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению процесса конденсации углерода при детонации энергетических материалов (ЭМ) возник после открытия детонационного синтеза алмаза [1, 2], который проявляется и сегодня [3-5]. Позднее интерес к изучению процесса конденсации углерода при детонации ЭМ возник при изучении триаминотринитробензола (ТАТБ) в ядерных центрах России и США. В работах [6, 7] было показано, что предположение о дополнительном выделении энергии за зоной химической реакции позволяет лучше описать экспериментальные данные по ускорению металлических пластин. Было выдвинуто предположение, что дополнительная энергия выделяется при длительной экзотермической конденсации углерода не только в зоне химической реакции, но и в волне разгрузки.

В это же время появились первые эксперименты по регистрации кинетики формирования конденсированного углерода методом малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР), которые показали длительный рост сигнала при детонации ТГ [8]. В работе [9] представлена динамика конденсации углерода при детонации различных ЭМ диаметром 20 мм.

Ранее было доступно только изучение сохраненной после взрыва шихты, включая наноалмазы, что не могло дать объективной оценки процессов, происходящих на микросекундных временах.

На сегодняшний день активно развиваются методики по исследованию быстротекущих процессов с использованием синхротронного излучения, в том числе методика МУРР для исследования энергетических материалов.

Аналогичная нашей станции построена и введена в эксплуатацию экспериментальная станция в США на ускорительном комплексе Advanced Photon Source

[10-13]. В работе [11] удалось проследить эволюцию сигнала МУРР при детонации заряда гексанитростильбена (ГНС) диаметром около 6 мм со скважностью около 50 нс вблизи детонационного фронта. Все процессы, приводящие к изменению формы сигнала МУРР, завершаются за 300 нс [11]. В работе [12] получена динамика роста углеродных наночастиц при детонации состава «В» (смеси тротила с гексогеном) диаметром 10 мм. В работе [11], кроме этого, представлена попытка определения фазового состава конденсированного углерода используя степенной закон. Отмечено, что он разный у ГНС и состава «В».

На сегодняшний день методика малоуглового рентгеновского рассеяния синхротронного излучения (СИ) является уникальной методикой, которая позволяет проследить динамику процесса конденсации углерода в детонационном процессе [8-17].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты по измерению МУРР были выполнены на 8 канале ускорительного комплекса ВЭПП-4М (ИЯФ СО РАН). Общая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Пучок СИ формируется коллиматором Кратки (ножи K_1 и K_2), который установлен перед взрывной камерой. Прямой пучок перед детектором отсекался ножом K_3 . Рассеянные лучи регистрировались детектором DIMEX [18] с угловым разрешением $3 \cdot 10^{-5}$ радиан.

Расстояние от центра заряда до детектора составляло 3432 мм. Стрипы детектора имеют размер 0.1 мм. Так, один канал детектора в этих экспериментах на ВЭПП-4 соответствует углу рассеяния 2θ : 1 канал детектора = 0.02914 мрад (рисунок 1).

Использовался двухбанчевый режим (режим кода сгустки в ускорители летает два сгустка диаметрально

противоположно) с током около 10 мА, энергией 4 ГэВ и периодичностью 611 нс (продолжительность импульса СИ составляла 73 пс) [19]. Для получения СИ от ускорительного кольца использовался 9-полюсный вигглер с полем в магнитах 1.95 Тл. Спектральная характеристика источника и возможность его использования для анализа сигнала МУРР подробно описаны в [16]. Экспериментально измеренный сигнал рентгеновского рассеяния приведен на рис. 2.

Использовались различные способы восстановления информации о процессе по данным рентгеновского рассеяния – измерение интегрального сигнала рассеяния, приближение Гинье, распределение частиц по размерам. Все эти методики показывают длительную динамику процесса – в течении нескольких микросекунд.

Подробно схема эксперимента и методики обработки экспериментальных данных описаны в [9, 14-17]

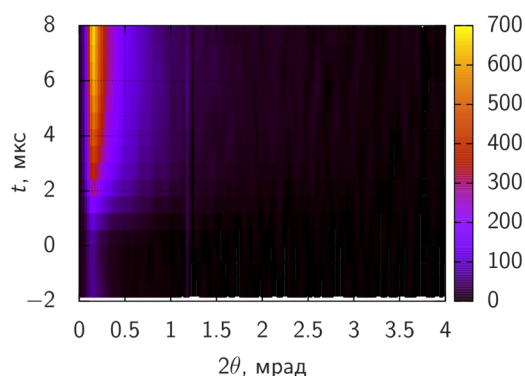


Рис. 2. МУРР при детонации смеси тротила с гексогеном диаметром 20 мм. Цветом обозначена интенсивность сигнала рентгеновского рассеяния.

Анализ данных электронной микроскопии [20] совместно с данными МУРР показал, что для расшифровки структуры детонационного углерода и ее динамики по данным рентгеновского рассеяния необходим учет двух масштабных уровней – частицы и структуры из этих частиц (кластеры) [17]. Восстановленная динамика двух уровней конденсации углерода при детонации заряда тротил-гексогеновой смеси диаметром 20 мм представлена на рис. 3. Видно, что частицы размером порядка 8 нм образуются практически сразу (в первом экспериментальном кадре, привязка к фронту детонации составляет ± 611 нс). В первом кадре также уже наблюдаются и структуры из этих частиц, а в дальнейшем их рост продолжается в течении нескольких микросекунд [17].

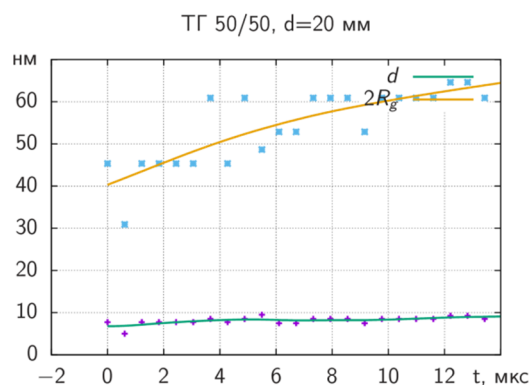


Рис. 3. Зависимости размера частиц и кластеров от времени при детонации заряда смеси тротила с гексогеном диаметром 20 мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует два характерных времени формирования конденсированной фазы и изменения ее формы. В первой быстрой фазе, с учетом временного разрешения методики, за время не более 1 мкс в основном формируются частицы и начальные кластеры. Во второй фазе, на протяжении нескольких микросекунд происходит дальнейший рост кластеров, при этом, размеры частиц практически не меняются.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90028. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Волков, К.В. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ / К. В. Волков, В. В. Даниленко, В. И. Елин // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т. 26, № 3. – С. 123–125.
2. Получение алмазов из взрывчатых веществ / А.И. Лямкин [и др.] // Доклады Академии наук. – 1988. – Т. 302, № 3. – С. 611–613.
3. Кудряшова, О.Б. Избыточная энергия детонационных наноалмазов / О.Б. Кудряшова, Е.А. Петров, А.А. Ветрова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 3. – С. 58–62.
4. Текстура поверхности и субструктура промышленных детонационных наноалмазов / К.Н. Соловьёва [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 6. – С. 96–100.
5. Сакович, Г.В. Детонационные наноалмазы. Синтез. Свойства. Применение / Г.В. Сакович, А.С. Жарков, Е.А. Петров // Наука и технологии в промышленности. – 2011. – № 4. – С. 53–61.
6. Tarver, C.M., J. M. Kury, and R.D. Breithaupt “Detonation waves in triaminotrinitrobenzene” *Journal of Applied Physics*, vol. 87, no. 8, pp. 3771-3782, 1997.
7. Grebenkin, K.F., M.V. Taranik, and A.L. Zherebtsov “Computer modeling of scale effects at heterogeneous HE detonation” *Proceedings Thirteenth International Detonation Symposium*. Publication No. ONR 351-07-01, pp. 496–505, 2006
8. Применение синхротронного излучения для исследования детонационных и ударно-волновых процессов / А.Н. Алешаев [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 5. – С. 104–113.
9. Ten, K.A., V.M. Titov, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, B.P. Tolochko, Yu.A. Aminov, B.G. Loboyko, A.K. Muzyrta, and

E.B. Smirnov “Carbon condensation in detonation of high explosives” *Proceedings Fifteenth International Detonation Symposium*. Publication N ONR-43-280-15, pp. 369–374, 2015.

10. Bagge-Hansen, M., L. Lauderbach, R. Hodgins, S. Bastea, L. Fried, A. Jones, T. van Buuren, D. Hansen, J. Benterou, C. May, T. Graber, B.J. Jensen, J. Ilavsky, and T.M. Willey “Measurement of carbon condensates using small-angle X-ray scattering during detonation of the high explosive hexanitrostilbene” *Journal of Applied Physics*, vol. 117, no. 24, pp. 245902, 2015.

11. Willey, T.M., M. Bagge-Hansen, L. Lauderbach, R. Hodgins, D. Hansen, C. May, T. van Buuren, D.M. Dattelbaum, R.L. Gustavsen, E.B. Watkins, M.A. Firestone, B. J. Jensen, T. Graber, S. Bastea, and L. Fried “Measurement of carbon condensates using small-angle x-ray scattering during detonation of high explosives” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1793, is. 1, pp. 030012, 2017.

12. Millicent, A.F., D.M. Dattelbaum, D.W. Podlesak, R.L. Gustavsen, R.C. Huber, B.S. Ringstrand, E.B. Watkins, B. Jensen, T. Willey, L. Lauderbach, R. Hodgins, M. Bagge-Hansen, T. van Buuren, S. Seifert and T. Graber “Structural evolution of detonation carbon in composition B by X-ray scattering” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1793, is. 1, pp. 030012, 2017.

13. Hammons, J.A., M.H. Nielsen, M. Bagge-Hansen, S. Bastea, C. May, W.L. Shaw, A. Martin, Y. Li, N. Sinclair, L. M. Lauderbach, R.L. Hodgins, D.A. Orlikowski, L.E. Fried, and T.M. Willey “Submicrosecond aggregation during detonation synthesis of nanodiamond” *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 12, no. 22, pp. 5286–5293, 2021.

14. Rubtsov, I.A., K.A. Ten, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, B.P. Tolochko, L.I. Shechtman, and V.V. Zhulanov “Synchrotron radiation method for study the dynamics of nanoparticle sizes in trinitrotoluene during detonation” *Physics Procedia*, vol. 84, pp. 374–381, 2016.

15. Rubtsov, I.A., K.A. Ten, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, S.I. Kremenko, M.S. Voronin, L.I. Shechtman, V.V. Zhulanov, B.P. Tolochko “Methods to restore the dynamics of carbon condensation during the detonation of high explosives” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1147, pp. 012038, 2019.

16. Rubtsov, I.A., K.A. Ten, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, Ya.V. Zubavichus, G.S. Peters, and A.A. Veligzhanin “Restoring size of detonation nanodiamonds from small-angle x-ray scattering of polychromatic synchrotron radiation beam” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1787, pp. 012029, 2021.

17. Рубцов, И.А. Исследование динамики размеров наночастиц конденсированного углерода при детонации энергетических материалов методом малоуглового рентгеновского рассеяния

[Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 1.3.17: защищена 15.12.22: утв. 29.04.22 / Рубцов Иван Андреевич. – Н., 2021. – 119 с. – Библиогр.: с. 103–119.

18. Shekhtman, L.I., V.M. Aulchenko, V.N. Kudryavtsev, V.D. Kutovenko, V.M. Titov, V.V. Zhulanov, E.R. Prueel, K.A. Ten, and B.P. Tolochko “Upgrade of the Detector for Imaging of Explosions” *Physics Procedia*, vol. 84, pp. 189 - 196, 2016.

19. Blinov, V.E., V.S. Bobrovnikov, K.V. Zolotarev, V.A. Kiselev, S.A. Kononov, G.Y. Kurkin, E.B. Levichev, O.I. Meshkov, N.Y. Muchnoi, S.A. Nikiti, D.M. Nikoilenko, D.P. Sukhanov, Y.A. Tikhonov, B.P. Tolochko, G.M. Tumaikin, A.G. Shamov, and D.N. Shatilov “The status of vepp” *Physics of Particles and Nuclei Letters*, vol. 4, no. 11, pp. 620-631, 2014

20. Kashkarov, A.O., E.R. Prueel, K.A. Ten, I.A. Rubtsov, E.Yu. Gerasimov, and P.I. Zubkov “Transmission electron microscopy and x-ray diffraction studies of the detonation soot of high explosives” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 774, pp. 012072, 2016.

Рубцов Иван Андреевич – к.ф.-м.н., младший научный сотрудник лаборатории физики взрыва, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН; научный сотрудник отдела синхротронных исследований, ЦКП «СКИФ» Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, тел. (383)3333249, e-mail: i.a.rubtsov@srf-skif.ru.

Тен Константин Алексеевич – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики взрыва, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, тел. (383)3333249, e-mail: ten@hydro.nsc.ru

Пруэл Эдуард Рейнович – к.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, тел. (383)3333249, e-mail: pruel@hydro.nsc.ru

Кашкаров Алексей Олегович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физики взрыва, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, тел. (383)3333249, e-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

Студенников Алексей Александрович – инженер лаборатории физики взрыва, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН; инженер отдела синхротронных исследований, ЦКП «СКИФ» Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, тел. (383)3333249, e-mail: a.a.studennikov@srf-skif.ru

Взрывная камера

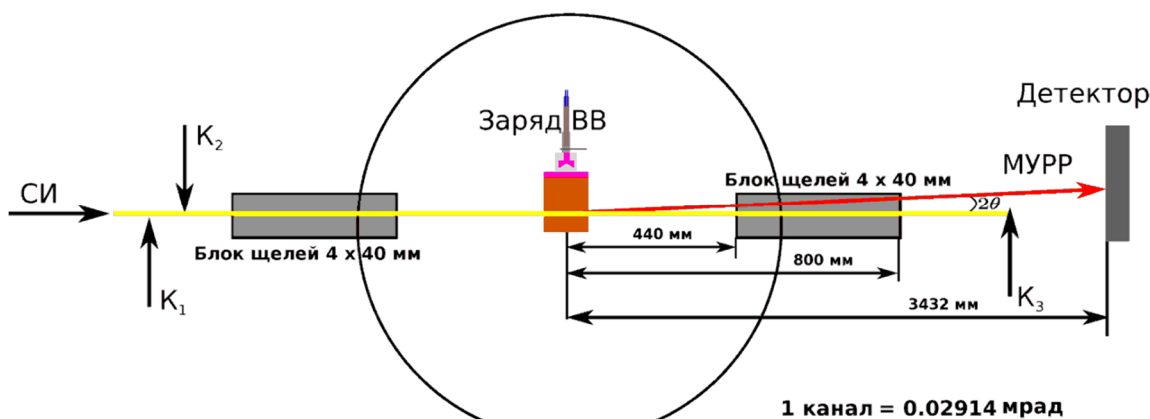


Рис. 1. Общая схема экспериментов по измерению МУРР на станции ускорительного комплекса ВЭПП-4

STUDYING THE PROCESS OF CARBON CONDENSATION DURING DETONATION HIGH ENERGY MATERIALS

I.A. Rubtsov^{1,2}, K.A. Ten¹, E.R. Prueel¹, A.O. Kashkarov¹, A.A. Studennikov^{1,2}

¹ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk

² Synchrotron Radiation Facility - Siberian Circular Photon Source "SKIF" Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Kol'tsovo

Carbon condensation during the detonation of high energy materials (EM) with a negative oxygen balance is one of the important processes occurring in the chemical reaction zone and the Taylor wave. A detailed study of this process is necessary to clarify the equations of state and optimize the detonation and propellant properties of EM. The paper presents the parameters of the kinetics of carbon condensation behind the chemical reaction zone during the detonation of EM with a negative oxygen balance.

Index terms: high energy materials, detonation, carbon condensation, small-angle X-ray scattering, synchrotron radiation.

REFERENCES

1. Volkov, K.V., V.V. Danilenko, and V.I. Elin "Synthesis of diamond from the carbon in the detonation products of explosives" *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 26, is. 3, pp. 366-368, 1990.
2. Lyamkin, A.I., E.A. Petrov, A.P. Ershov, G.V. Sacovich, A.M. Staver, and V.M. Titov "Production of diamond from explosives" *Soviet Physics. Doklady*, vol. 33, no. 3, pp. 705-706, 1988.
3. Kudryashova, O.B., E.A. Petrov, and A.A. Vetrova "Excessive energy of detonation nanodiamonds" *South-Siberian Scientific Bulletin*, is. 3, pp. 58-62, 2021.
4. Solovyeva, K.N., A.A. Kolesova, E. A. Petrov, and M.A. Khimich "The texture of the surface and substructure of industrial detonation nanodiamonds" *South-Siberian Scientific Bulletin*, is. 6, pp. 96-100, 2020.
5. Sakovich, G.V., A.S. Zharkov, and E.A. Petrov "Detonacionnyye nanoalmazy. Sintez. Svoystva. Primenenie" *Nauka I tekhnologii v promyshlennosti*, no. 4, pp. 53-61, 2021 [RUSSIAN].
6. Tarver, C.M., J.M. Kury, and R.D. Breithaupt "Detonation waves in triaminotrinitrobenzene" *Journal of Applied Physics*, vol. 87, no. 8, pp. 3771-3782, 1997.
7. Grebenkin, K.F., M.V. Taranik, and A.L. Zherebtsov "Computer modeling of scale effects at heterogeneous HE detonation" *Proceedings Thirteenth International Detonation Symposium*. Publication No. ONR 351-07-01, pp. 496-505, 2006
8. Aleshaev, A.N., P.I. Zubkov, G.N. Kulipanov, L.A. Luk'yanchikov, N.Z. Lyakhov, S.I. Mishnev, K.A. Ten, V.M. Titov, B.P. Tolochko, M.G. Fedotov and M.A. Sheromov "Application of Synchrotron Radiation for Studying Detonation and Shock-Wave Processes" *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 37, is. 5, pp. 585-593, 2001.
9. Ten, K.A., V.M. Titov, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, B.P. Tolochko, Yu.A. Aminov, B.G. Loboyko, A.K. Muzyrya, and E.B. Smirnov "Carbon condensation in detonation of high explosives" *Proceedings Fifteenth International Detonation Symposium*. Publication N ONR-43-280-15, pp. 369-374, 2015.
10. Bagge-Hansen, M., L. Lauderbach, R. Hodgkin, S. Bastea, L. Fried, A. Jones, T. van Buuren, D. Hansen, J. Benterou, C. May, T. Graber, B.J. Jensen, J. Ilavsky, and T.M. Willey "Measurement of carbon condensates using small-angle X-ray scattering during detonation of the high explosive hexanitrostilbene" *Journal of Applied Physics*, vol. 117, no. 24, pp. 245902, 2015.
11. Willey, T.M., M. Bagge-Hansen, L. Lauderbach, R. Hodgkin, D. Hansen, C. May, T. van Buuren, D.M. Dattelbaum, R.L. Gustavsen, E.B. Watkins, M.A. Firestone, B.J. Jensen, T. Graber, S. Bastea, and L. Fried "Measurement of carbon condensates using small-angle x-ray scattering during detonation of high explosives" *AIP Conference Proceedings*, vol. 1793, is. 1, pp. 030012, 2017.
12. Millicent, A.F., D.M. Dattelbaum, D.W. Podlesak, R.L. Gustavsen, R.C. Huber, B.S. Ringstrand, E.B. Watkins, B. Jensen, T. Willey, L. Lauderbach, R. Hodgkin, M. Bagge-Hansen, T. van Buuren, S. Seifert, and T. Graber "Structural evolution of detonation carbon in composition B by X-ray scattering" *AIP Conference Proceedings*, vol. 1793, is. 1, pp. 030012, 2017.
13. Hammons, J.A., M.H. Nielsen, M. Bagge-Hansen, S. Bastea, C. May, W.L. Shaw, A. Martin, Y. Li, N. Sinclair, L.M. Lauderbach, R.L. Hodgkin, D.A. Orlikowski, L.E. Fried, and T.M. Willey "Submicrosecond aggregation during detonation synthesis of nanodiamond" *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 12, no. 22, pp. 5286-5293, 2021.
14. Rubtsov, I.A., K.A. Ten, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, B.P. Tolochko, L.I. Shechtman, and V.V. Zhulanov "Synchrotron radiation method for study the dynamics of nanoparticle sizes in trinitrotoluene during detonation" *Physics Procedia*, vol. 84, pp. 374-381, 2016.
15. Rubtsov, I.A., K.A. Ten, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, S.I. Kremenko, M.S. Voronin, L.I. Shechtman, V.V. Zhulanov, and B.P. Tolochko "Methods to restore the dynamics of carbon condensation during the detonation of high explosives" *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1147, pp. 012038, 2019.
16. Rubtsov, I.A., K.A. Ten, E.R. Prueel, A.O. Kashkarov, Ya.V. Zubavichus, G.S. Peters, and A.A. Veligzhanin "Restoring size of detonation nanodiamonds from small-angle x-ray scattering of polychromatic synchrotron radiation beam" *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1787, pp. 012029, 2021.
17. Rubtsov, I.A. "Issledovanie dinamiki razmerov nanochastich kondensirovannogo ugleroda pri detonacii energeticheskikh materialov metodom malouglovogo rentgenovskogo rasseyaniya" Candidate of Physico-mathematical Sciences dissertation, Novosibirsk, 2021 [RUSSIAN].
18. Shechtman, L.I., V.M. Aulchenko, V.N. Kudryavtsev, V.D. Kutovenko, V.M. Titov, V.V. Zhulanov, E.R. Prueel, K.A. Ten, and B.P. Tolochko "Upgrade of the Detector for Imaging of Explosions" *Physics Procedia*, vol. 84, pp. 189 - 196, 2016.
19. Blinov, V.E., V.S. Bobrovnikov, K.V. Zolotarev, V.A. Kiselev, S.A. Kononov, G.Y. Kurkin, E.B. Levichev, O.I. Meshkov, N.Y. Muchnoi, S.A. Nikiti, D.M. Nikoilenko, D.P. Sukhanov, Y.A. Tikhonov, B.P. Tolochko, G.M. Tumaikin, A.G. Shamov, and D.N. Shatilov "The status of vepp" *Physics of Particles and Nuclei Letters*, vol. 4, no. 11, pp. 620-631, 2014

20. Kashkarov, A.O., E.R. Pruel, K.A. Ten, I.A. Rubtsov, E.Yu. Gerasimov, and P.I. Zubkov "Transmission electron microscopy and x-ray diffraction studies of the detonation soot of high explosives" *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 774, pp. 012072, 2016.

Rubtsov Ivan Andreevich –Candidate of Physico-mathematical Sciences, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, research scientis at Explosion Physics Laboratory; Synchrotron Radiation Facility - Siberian Circular Photon Source "SKIF" Boreskov Institute of Catalysis SB RAS research scientis at Synchrotron Research Department, (383)3333249, e-mail: i.a.rubtsov@srf-skif.ru

Ten Konstantin Alekseevich –Candidate of Physico-mathematical Sciences, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, leading research scientis at Explosion Physics Laboratory, (383)3333249, e-mail: ten@hydro.nsc.ru

Pruel Eduard Reynovich –Candidate of Physico-mathematical Sciences, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, deputy director, (383)3333249, e-mail: pru@hydro.nsc.ru

Kashkarov Alexey Olegovich –Candidate of Physico-mathematical Sciences, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, senior research scientis at Explosion Physics Laboratory, (383)3333249, e-mail: ten@hydro.nsc.ru

Studennikov Alexey Aleksandrovich –Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, engineer at Explosion Physics Laboratory; Synchrotron Radiation Facility - Siberian Circular Photon Source "SKIF" Boreskov Institute of Catalysis SB RAS engineer at Synchrotron Research Department, (383)3333249, e-mail: a.a.studennikov@srf-skif.ru.