

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
БЕЛАРУСЬ

УО «Витебский государственный технологический университет»

УДК 534.321.9: 621.762.4

Номер гос.рег. 20064324

Инв. № _____



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

В.В. Пятов

« 28 » 12. 2010 г.

ОТЧЕТ

о научно-исследовательской работе

«Влияние ультразвуковых колебаний на процесс прессования неметаллических порошковых материалов при сложном напряженно-деформированном нагружении»
(заключительный)

Задание «Нанотех» № 5.18

ГКПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии»

2006 – г/б - 352

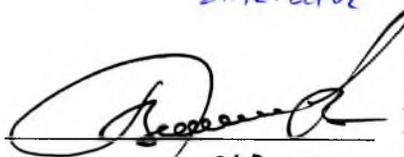
Начальник НИС



С.А. Беликов

21.12.2010г

Руководитель задания
д.т.н.



В.В. Рубаник

21.12.2010г

Витебск 2010

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,

д.т.н., профессор,

кафедры «Физика»

21.12.10 г.

В.В. Рубаник

(общее руководство НИР,
заключение, раздел 1-21)

Исполнители:

- | | | |
|----------------------|--|---|
| 1. к.ф.-м.н., доцент | | 21.12.10 г. В.В. Рубаник (мл.) (раздел 3,4,6,10,15) |
| 2. к.ф.-м.н., доцент | | 21.12.10 г. А.Д. Шилин (раздел 2,3,5-21) |
| 3. лаборант | | 21.12.10 г. В.С. Сапежинский(раздел 3,11,12,16,18) |
| 4. ассистент | | 21.12.10 г. В.Н. Кузнецов (раздел 6,10,14,18) |
| 5. ст. преподаватель | | 21.12.10 г. О.Е. Рубаник (раздел 11,15) |
| 7. студент | | 21.12.10 г. И.К. Иканович (раздел 19,20) |
| 8. студент | | 21.12.10 г. А.А. Быстрикова (раздел 19,20) |

Нормоконтролер

О.Н. Билецкая

21.12.10 г.



РЕФЕРАТ

Отчет 124 с., 71 рис., 4 таблицы, 84 источника.

ПРЕССОВАНИЕ, ЦИРКОНАТ - ТИТАНАТ СВИНЦА, БАРИЙ - ЦИРКОНАТ- ТИТАНАТ СВИНЦА, УЛЬТРАЗВУК, ПОРОШОК, УПЛОТНЕНИЕ, ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ СЕГНЕТО – И ПЬЕЗОКЕРАМИКА.

Объектом исследования является порошок и керамика цирконата - титаната свинца (ЦТС-19), барий - цирконата- титаната свинца (ЦТБС-3М).

Целью работы является комплексное исследование процесса интенсивных механических воздействий на пресс-порошок с использованием энергии ультразвуковых колебаний, взрыва, деформации сдвига и высоких давлений.

08.2.4.1 Изучены физико-механические свойства синтезированной керамики, включающее в себя экспериментальное исследование, разработку технологии и её реализацию для создания пьезокерамических элементов промышленного назначения.

08.2.4.3 - использование полученных результатов при производстве изделий из сегнето- и пьезокерамических материалов с улучшенными физико-механическими свойствами, прогнозирование свойств керамики получаемой в разных технологических процессах.

08.2.4.4 - получение сегнето- и пьезокерамики.

08.2.4.6 - Проведение исследований физико-механических свойств изделий, получаемых из механоактивированных неметаллических порошков.

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

| | | |
|----|--|----|
| | Введение | 6 |
| 1 | Методика эксперимента | 8 |
| 2 | Методика измерений диэлектрических и резонансных характеристик пьезокерамики | 15 |
| 3 | Отработка методики получения пьезокерамики | 19 |
| 4 | Методика определения температур фазовых превращений | 25 |
| 5 | Методы измерения параметров пьезоэлектрической керамики | 28 |
| 6 | Экспериментальная установка для прессования заготовок с использованием мощных ультразвуковых колебаний | 32 |
| 7 | Исследование влияния связки на микроструктуру керамики ЦТБС-3М, полученной с использованием ультразвуковых колебаний. | 37 |
| 8 | Влияние степени дисперсности исходных порошков на свойства керамики ЦТБС-3М, полученной с использованием ультразвуковых колебаний. | 44 |
| 9 | Выбор режимов прессования керамики ЦТБС-3М, полученной с использованием ультразвуковых колебаний. | 48 |
| 10 | Конструирование установки для прессования пресс-порошков с мощностью подводимых УЗК 1 кВт | 51 |
| 11 | Экспериментальная установка для прессования пресс-порошков с мощностью подводимых УЗК 1 кВт | 56 |
| 12 | Получение пьезокерамики барий-титанат-цирконат свинца с использованием УЗК | 66 |
| 13 | Исследование свойств пьезокерамики барий-титанат-цирконат свинца, полученной с использованием УЗК. | 68 |
| 14 | Конструирование оснастки для прессования пресс-порошков с использованием УЗК и деформации сдвига | 71 |

| | | |
|----|---|-----|
| 15 | Оснастка для прессования пресс-порошков с использованием УЗК и деформации сдвига | 75 |
| 16 | Получение керамики цирконат-титанат свинца с использованием УЗК и деформации сдвига | 78 |
| 17 | Исследование керамики цирконат- титанат свинца, полученной с использованием УЗК и деформации сдвига | 84 |
| 18 | Получение керамики цирконат - титанат свинца с использованием высоких давлений и УЗК | 92 |
| 19 | Исследование диэлектрического отклика керамики барий- цирконат - титанат свинца, полученной с использованием высоких давлений и УЗК | 99 |
| 20 | Импеданс - спектроскопия керамики барий- цирконат - титанат свинца, полученной с использованием высоких давлений и УЗК | 105 |
| 21 | Обобщение экспериментальных результатов по получению керамики с использованием интенсивных механических воздействий на пресс- порошок | 109 |
| | Заключение | 114 |
| | Список использованных источников | 116 |
| | | |

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хасанов, О.Л. Ультразвуковая обработка наноструктурных порошков для изготовления циркониевой технической керамики / О.Л. Хасанов [и др.] // «Перспективные материалы», 2000 г. - № 1. - С. 50-55.
2. Прессование порошков титаната бария с наложением ультразвуковых колебаний / В.В. Клубович [и др.] // Изв. АНБ. сер физ-техн.- 1994. - № 3. - С. 16-19.
3. Хасанов, О.Л. Ультразвуковая технология изготовления конструкционной и функциональной нанокерамики / Соколов В.М. [и др.] // «Перспективные материалы», 2002 г. - № 1. - С. 76-83.
4. Харитонов Д.О. Физика и техника ультразвукового формообразования пьезокерамики: автореферат диссертации./ Д. О. Харитонов; Санкт-Петербург, 2006.-18с.
5. Красавина М.А., Легуша Ф.Ф., Пугачев С.И., Харитонов Д.О. Ультразвуковое формообразование в технологическом процессе изготовления изделий из неметаллических порошков. Труды 3-ей межд. конференции по морским интеллектуальным технологиям "Моринтех-99". СПб.: 1999, т.1. С. 235-237.
6. Хасанов О.Л. Научные основы сухого компактирования ультрадисперсионных порошков в технологии изготовления нанокерамики.: диссертация ... доктора технических наук./ О.Л. Хасанов. - Томск, ТПУ, 2003. - 371с.
7. Кальнер В.Д. Практика микронзондовых методов исследования металлов и сплавов / В.Д. Кальнер, А.Г. Зильберман – М.: Металлургия, 1981- 216 с.
8. Практическая растровая электронная микроскопия. // Под ред. Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица.- М.: Мир, 1978. - 656 с.
9. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: в 2-х книгах / Дж. Гоулдстейн [и др.]- М.: Мир, 1984.- 2т. – 296 с.
10. Брандон, Д Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М. : Техносфера, 2006. – 384 с.

11. Северденко В.П., Клубович В.В. Прессование трудноформируемых материалов при наложении ультразвуковых колебаний. Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов. – М. Металлургия 1970. С. 287-290.
12. Минин В.М. Использование ультразвука для обработки термопластичных шликеров. Порошковая металлургия. – 1990ю – №11. – С.36-40
13. Анненков Ю.М., Апаров Н.Н., Соколов В.М. и др. Упрочнение корундоцирконевой керамики при ультразвуковом компактировании. Стекло и керамика. -1994. – № 11-12. –С.25-27.
14. Пат. 2007272 РФ, МКИ В 22 Р 3/02. Способ прессования порошкового материала / В.В. Клубович, Г.С. Бобровская, В.В. Рубаник, В.К. Высоцкий (РФ).- № 4892743/02; Заявлено 19.12.90; Опубл. 15.02.94; Бюл. № 3 // Изобретения- 1994-С. 87.
15. Теумин И.И. Ультразвуковые колебательные системы, Машгиз. 1959.
16. Костин Л.Г., Бучек Л.Т., Шкиль В.М. Схемы ультразвукового прессования порошковых материалов и инженерные методы расчета акустической системы.
17. Пугачев, С.И. Физические и технологические задачи ультразвукового формообразования изделий из пьезокерамических порошков: тезисы докладов региональной НТК. / С.И. Пугачев, Д.О. Харитонов. // Изд. центр СПбГМТУ. - СПб., 1998. - С. 40 - 41.
18. Ультразвуковое формообразование в технологическом процессе изготовления изделий из неметаллических порошков: труды 3-ей межд. конференции по морским интеллектуальным технологиям "Моринтех-99" / Красавина М.А. [и др.]. // СПб.: 1999. - Т.1. - С. 235-237.
19. Ультразвуковое формообразование изделий из пьезокерамических порошков: труды 3-ей межд. научн.-технич. конф. "АПЭП-96" / Попов Н.М. [и др.] - Новосибирск, 1996. - Т.1. - С. 192.
20. Ильющенко, А.Ф., Получение высокоплотных керамик различного назначения с использованием наноразмерных порошков и энергии взрыва. / А.Ф. Ильющенко // Материалы Первой международной научной конференции НАНО- 2008, Минск, 22-25 апреля 2008 года. - С 345-347.

21. Смажевская, Е.Г. Пьезоэлектрическая керамика. / Е. Г. Смажевская, Н. Б. Фельдман. – М., 1971. - 199 с.
22. Агранат, Б.А. Ультразвук в порошковой металлургии. / Б. А. Агранат [и др.]. – М: 1986. - 168 с.
23. Патент РФ № 2100313, с 04 В 35/00. В 1/087, публ. 1997 г. А.С. СССР № 954184, В 22 F 3/02, публ 1982 г.
24. А.С. СССР №954184, В 22 F 3/02, публ. 27.07.2001г.
25. Патент РФ №2171177. Способ формообразования изделий из дисперсных материалов. Оpubл. 27.07.2001. Бюл. №21 / Ерофеев А.Д., Красавина М.А., Легуша Ф.Ф. и др.
26. Publication number 1020000050969A. Korean patent abstracts. 05.08.2000.
27. Артемьев В.В., Клубович В.В., Рубаник В.В. Ультразвук и обработка материалов. – Мн.: «Экоперспектива» 2003 . 355 с.
28. Козловский Л.В., Красавина МА., Пугачев СИ. «Новые разработки в ультразвуковой технике и их применение в народном хозяйстве». – Л.: 1987. С. 17-20.
29. Красавина М.А., Кувшинов Г.И., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. // ФиХОМ, 1996. Вып. 4. С. 100-107.
30. Красавина МА., Легуша Ф.Ф., Пугачев СИ. «Моринтех-99». – СПб: 1999. Т.1. С. 238-241.
31. Козловский Л.В., Красавина М.А. Пугачев С.И., Семенова Н.Г. «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности», СПб; 2000. Т.1. С. 192-195.
32. Красавина М.А., Пугачев С.И., Семенова И.Г., Третьяков В.В. «XI сессия Российского акустического общества», – М: 2001. Т.2. С. 254-258.
33. Прохоренко И.Л., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Ультразвуковая металлизация материалов. – Минск: Наука и техника, 1987.
34. Пугачев С.И., Семенова Н.Г. «Ультразвук в технологии машиностроения». – Архангельск: 1991. С. 128-131.
35. Раковский В.С. «Порошковая металлургия». – Сб. трудов НИИ, автопром вып. 4. 1965.

36. Коновалов Е.Д., Жданович В.А. Сб. «Пластичность и обработка металлов давлением». – Изд-во «Наука и техника», Минск, 1968.
37. Бальшин М.Ю. Тезисы докладов конференции ВНИИТС, 1961.
38. Малышкина О.В., Барабанова Е.В., Гаврилова Н.Д., Лотонов А.М. Диэлектрический отклик и механизмы проводимости в сегнетоэлектрической керамике феррониобата свинца. Письма в ЖТФ, 2007, т.33, вып.18.
39. Рогозин В.Д., Трудов А.Ф. Взрывное дробление компонентов порошковой шихты пьезокерамики системы ЦТС. Физика и химия обработки материалов. №1. 2001. С.68-71.
40. Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Шилин А.Д., Клубович В.В. и др. Отчет о НИР «Влияние ультразвуковых колебаний на процесс прессования неметаллических порошковых материалов при сложном напряженно- деформированном нагружении». Годовой отчет 2007. ГУ «БелИСА» Номер гос.рег. 20063612. 34 с.
41. Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Шилин А.Д., Милюкина С.Н., Сапежинский В.С., Степанов Д.А., Кузнецов В.Н. Отчет о НИР «Влияние ультразвуковых колебаний на процесс прессования неметаллических порошковых материалов при сложном напряженно- деформированном нагружении». Годовой отчет 2006. ГУ «БелИСА» Номер гос.рег. 20064324. 41с.
42. Рогозин В.Д., Трудов А.Ф. Взрывное дробление компонентов порошковой шихты пьезокерамики системы ЦТС. Физика и химия обработки материалов. №1. 2001. С.68-71.
43. Прюммер Р. Обработка порошковых материалов взрывом. М.: Мир. 128 с.
44. Фесенко Е. Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество. – М.: Атомиздат. – 1971. 248 с.
45. Лайнс М., Глас А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. – М.: Мир, 1981, 736 с.
46. Глозман И.А. Пьезокерамика. М.: «Энергия». – 1972. 288 с.
47. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики / Смоленский Г. А. и др. – М.: «Наука» – 1971. 476 с.
48. Жёлудев И. С. Основы сегнетоэлектричества. – М.: Атомиздат. – 1973. 477с.

49. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики / Смоленский Г. А. и др. – М.: «Наука» – 1971. 476 с.
50. Сысоев В.Ф., Зырянов В.В. Влияние морфологии порошков BaTiO_3 , полученных при механической обработке, на рост зерен. «Неорганические материалы», т.27, №9 1991 г. С. 1986-1987.
51. Клубович В.В., Рубаник В.В, Рубаник В.В. мл., Шилин А.Д. Формообразование пьезокерамики в одноосной пресс-форме с возбуждением ультразвуковых колебаний. Материалы докладов 7-й международной научно-технической конференции “Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия”. 16-17 мая 2006г, . Минск, Беларусь. С. 67.
52. Шилин А.Д., Рубаник В.В., Рубаник В.В. Микроструктура керамики, полученной прессованием в поле акустических волн. Сборник докладов. Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела». ФТТ-2007. Минск 23-26 октября 2007 г. С.256-258.
53. Пугачев С.И., Семенова Н.Г. «Ультразвук в технологии машиностроения». – Архангельск: 1991. С. 128-131.
54. Рубаник В.В, Клубович В.В., Рубаник В.В. мл., Шилин А.Д., Платов С.И. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс прессования неметаллических порошковых материалов. Тезисы докл. XVI Международная конференция “Физика прочности и пластичности материалов. 26-29 июня 2006 г. г. Самара, Россия. С. 252.
55. Сысоев В.Ф., Бохонов Б.Б. Структура и спекание механохимических агрегатов BaTiO_3 . «Неорганические материалы», т.26, № 4, 1990 г. С.798-800 .
56. Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Похолков Ю.П. Соколов В.М. Механизмы ультразвукового прессования керамических нанопорошков. «Перспективные материалы», № 3, 1999 г. С. 88-94
57. Хасанов О.Л., Иванов Ю.Ф., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Козлов Э.В., Дедов Н.В., Похолков Ю.П. Бикбаева З.Г., Полисадова В.В., Структура и

- фазовый состав циркониевой нанокерамики, изготовленной с применением ультразвукового прессования. «Перспективные материалы», № 5 1999 г., С. 52-60
58. Яффе Б., Кук У., Яффе Г. Пьезоэлектрическая керамика / Пер. с англ. под ред. Л. А. Шувалова. – М.: Мир – 1974. 386 с.
59. Агранат Б.А., Гудович А.П., Нежевенко П.Б. Ультразвук в порошковой металлургии. – М: 1986. 168 с.
60. Прессование порошков титаната бария с наложением ультразвуковых колебаний / Клубович В.В., Высоцкий В.К., Бобровская Г.С., Рубаник В.В. // Весці Акад. навук Беларусі, сер. фіз.-тэхн. навук, – 1994. № 3. С. 17-19.
61. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. – М.: « Энергия», 1976. 336 с.
62. Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применение. – М.: «Мир», 1981. 526 с.
63. Хасанов О.Л., Иванов Ю.Ф., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Козлов Э.В., Дедов Н.В., Похолков Ю.П., Бикбаева З.Г., Полисадова В.В. Структура и фазовый состав циркониевой нанокерамики, изготовленной с применением ультразвукового прессования. – Перспективные материалы. 1999. №5. С. 52 - 60.
64. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность. – Минск, "Наука и техника", 1976. 446 с.
65. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Обработка металлов давлением с ультразвуком. – Мн.: "Наука и техника", 1973. 286 с.
66. Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Шилин А.Д. Прессование порошков на основе цирконата-титаната свинца в поле ультразвуковой волны . Тезисы докладов международной научно-технической конференции “Материалы и оборудование и ресурсосберегающие технологии”. 20-21 апреля 2006г. г.Могилев, Беларусь С. 31.
67. Клубович В.В., Рубаник В.В., Рубаник В.В., Шилин А.Д. Прессование заготовок для пьезокерамики с помощью ультразвуковых колебаний. Тезисы докладов. Третья международная научно-практическая конференция. 14-17 марта 2007 г. Санкт-Петербург. С31-32, Ч 2.

68. Шилин А.Д., Рубаник В.В., Рубаник В.В. Получение пьезокерамики с использованием ультразвуковых колебаний. Сборник докладов. XLVI Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» 15-17 октября 2007 г., г. Витебск.
69. Пугачев С.И., Харитонов Д.О. Физические и технологические задачи ультразвукового формообразования изделий из пьезокерамических порошков: Тезисы докладов региональной НТК. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 1998. С. 40 - 41.
70. Легуша Ф.Ф., Попов Н.М., Пугачев С.И., Харитонов Д.О. Ультразвуковое формообразование тонких пьезокерамических дисков. Труды 4-ой межд. научн.-техн. конф. "АПЭП-98". г. Новосибирск. С.27.
71. Козловский Л.В., Красавина МА., Пугачев СИ. «Новые разработки в ультразвуковой технике и их применение в народном хозяйстве». – Л.: 1987. С. 17-20.
72. Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл., Петров И.В., Маркова Л.В.. Прессование порошков на основе цирконата-титаната свинца в поле взрывной волны. 10-я Международная конференция. Высокие давления -2008 фундаментальные и прикладные аспекты. Судак, Крым, Украина. 16-20 сентября 2008 года.
73. Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл.. Ультразвуковая технология изготовления сегнето- и пьезокерамики. III Международная научно-техническая конференция. Современные методы и технологии создания и обработки материалов. г. Минск, 15-17 октября 2008 года.
74. Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл., Петров И.В., Маркова Л.В.. Получение и свойства керамики ЦТБС-3М, компактированной с помощью взрывной волны. Материалы Первой международной научной конференции НАНО- 2008. г. Минск, 22-25 апреля 2008 года.
75. Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл. и др. Перспективные материалы / Витебск: Изд. Центр УО ВГТУ, 2009. – 542 С.

76. Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл., Петров И.В., Маркова Л.В., Коледа В.В. измельчение частиц пресс-порошка с использованием энергии взрыва и ультразвуковых колебаний // Тез. Докл. Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии», Беларусь, (Витебск, 2009), С. 25.
77. Рубаник В.В., Шилин А. Д., Рубаник В.В. мл. Диэлектрические свойства керамики, полученной прессованием в поле ударной волны и поле акустических волн // Тез. Докл. Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии», Беларусь, (Витебск, 2009), С. 26.
78. Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл., Петров И.В., Маркова Л.В., Янусов В.А.. Микроструктура керамики, полученной прессованием при сложном напряженно-деформированном нагружении // Тез. Докл. Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии», Беларусь, (Витебск, 2009), С.27 .
79. Шилин А. Д., Аристов А.А., Кузнецов В.Н., Рубаник О.Е. Экспериментальная установка для получения пресс-заготовок с использованием мощных ультразвуковых колебаний // Тез. Докл. Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии», Беларусь, (Витебск, 2009), С. 211.
80. Шилин А. Д., Рубаник В.В. мл. Свойства сегнетоэлектрической керамики, полученной с использованием ультразвуковых колебаний и энергии взрыва. // Сборник докладов Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела ФТТ -2009», Беларусь, Минск, 2009, С. 338(2-3).
81. В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.Д. Шилин, И.В. Петров, Л.В. Маркова . Активация порошков для получения сегнетоэлектрической керамики с использованием энергии взрыва и ультразвуковых колебаний // Abstctcs conferinta din Moldova. Chisinu 26-28 noitmbrie 2009. С. 172.
82. студ. Быстрикова А.А., студ. Иканович И.К., Рубаник В.В., Шилин А.Д. Применение методов ультразвукового компактирования сухих порошков для изготовления сегнетокерамики. Материалы докладов 43 научно-технической

конференции преподавателей и студентов УО «Витебский государственный технологический университет», Беларусь, Витебск, 22 апреля 2010, С.280-282.

83. В.В. Рубаник, А.Д. Шилин, В.В. Рубаник мл., И.В. Петров, Л.В. Маркова, Т.В. Гамзелева. Компактирование порошков сегнетокерамики с использованием ультразвуковых колебаний и энергии взрыва. Сборник материалов 50-го Международного научного симпозиума «Актуальные проблемы прочности» 27 сентября–1 октября 2010 года. Витебск, Беларусь. С.201-203.

84. В.В. Рубаник, А.Д. Шилин, В.В. Рубаник мл., И.В. Петров, Л.В. Маркова. Использование ультразвуковых колебаний и энергии взрыва для получения сегнетокерамики. Тезисы II Международной научной конференции «Наноструктурные материалы–2010: Беларусь-Россия-Украина» (НАНО–2010), 19–22 октября 2010 года г. Киев, С.179.

