



НАУЧНЫЙ
ФОРУМ
nauchforum.ru

ISSN: 2541-8394



№8(37)

**НАУЧНЫЙ ФОРУМ:
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

МОСКВА, 2020



НАУЧНЫЙ ФОРУМ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Сборник статей по материалам XXXVII международной
научно-практической конференции*

№ 8 (37)
Сентябрь 2020 г.

Издается с декабря 2016 года

Москва
2020

УДК 51/53+62

ББК 22+3

Н34

Председатель редколлегии:

Лебедева Надежда Анатольевна – доктор философии в области культурологии, профессор философии Международной кадровой академии, г. Киев, член Евразийской Академии Телевидения и Радио.

Редакционная коллегия:

Ахмеднабиев Расул Магомедович – канд. техн. наук, доц. кафедры строительных материалов Полтавского инженерно-строительного института, Украина, г. Полтава;

Данилов Олег Сергеевич – канд. техн. наук, научный сотрудник Дальневосточного федерального университета;

Маршалов Олег Викторович – канд. техн. наук, начальник учебного отдела филиала ФГАОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет" (НИУ), Россия, г. Златоуст.

Н34 Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам XXXVII междунар. науч.-практ. конф. – № 8 (37). – М.: Изд. «МЦНО», 2020. – 38 с.

ISSN 2541-8394

Статьи, принятые к публикации, размещаются на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

ISSN 2541-8394

ББК 22+3

© «МЦНО», 2020

Оглавление

Раздел 1. Технические науки	4
1.1. Металлургия и материаловедение	4
ПЬЕЗОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АППАРАТОВ УДАРНО–ВОЛНОВОЙ ТЕРАПИИ	4
Пономарев Сергей Григорьевич Смирнов Андрей Владимирович Васин Александр Александрович Резниченко Александр Владимирович Скворцов Аркадий Алексеевич	
ВИБРАЦИОННОЕ ФОРМОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА	22
Скворцов Аркадий Алексеевич Пономарев Сергей Григорьевич Васин Александр Александрович Резниченко Александр Владимирович	
Раздел 2. Математика	31
2.1. Вычислительная математика	31
ПОКАЗАТЕЛЬНЫЕ НЕРАВЕНСТВА В КУРСЕ МАТЕМАТИКИ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЙ	31
Тюренков Александр Алексеевич	

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

РАЗДЕЛ 1.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

1.1. МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ПЬЕЗОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АППАРАТОВ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ТЕРАПИИ

Пономарев Сергей Григорьевич

*канд. физ.-мат. наук, инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет",
РФ, г. Москва*

Смирнов Андрей Владимирович

*научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет",
РФ, г. Москва*

Васин Александр Александрович

*канд. техн. наук, инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет",
РФ, г. Москва*

Резниченко Александр Владимирович

*инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет",
РФ, г. Москва*

Скворцов Аркадий Алексеевич

д-р физ.-мат. наук, проф., ст. науч. сотр.,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"МИРЭА - Российский технологический университет",
РФ, г. Москва

Данное исследование выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению №05.604.21.0220 от 06 декабря 2019 г. (уникальный номер RFMEFI60419X0220), прикладные научные исследования проводятся по теме «Разработка отечественного аппарата ударно-волновой терапии на основе пьезоэлектрического аппликатора с изменяемой пространственной геометрией пятна фокусировки и энергией ударной волны».

Аннотация. В статье представлен обзор современного состояния исследований и экспериментальных разработок в области пьезоматериалов для ультразвуковых преобразователей, применяемых в аппаратах ударно-волновой терапии. Приводится общее описание пьезоэлектрических материалов и их основных типов, которые нашли применение в устройствах генерации ультразвуковых волн. Целью данной обзорной статьи является определение вида пьезоэлектрического материала, наиболее подходящего для изготовления пьезоэлектрических преобразователей ультразвука в аппаратах ударно-волновой терапии.

Ключевые слова: пьезокерамика, сегнетоэлектрики, ультразвуковые преобразователи, ударно-волновая терапия.

Введение

За последние 10-15 лет наблюдается стремительное развитие методов ударно-волновой терапии (УВТ). Эти методы основываются на различных эффектах взаимодействия ударной волны, создаваемой источником ультразвука, с тканями человеческого тела. Например, под воздействием ударной волны происходит прорастания капилляров (феномен неоангиогенеза), наблюдается приток стволовых клеток к месту процедуры.

Потенциал применения УВТ огромен и по производимому эффекту, и по реальным результатам при лечении все расширяющегося круга патологий таких как диабетическая стопа, несрастающиеся переломы, трофические язвы, сосудистая недостаточность, позвоночные грыжи, и т. д.

Для генерации ультразвуковых волн (в том числе и ударных волн) используют несколько типов преобразователей: гидравлические, пневматические, электромагнитные, пьезоэлектрические.

Для решения задач УВТ наиболее удобны к применению пьезоэлектрические преобразователи.

По сравнению с другими устройствами они имеют ряд неоспоримых преимуществ. Это технологичность, стабильность работы, простота конструкции, высокое быстродействие, долгий срок эксплуатации и дешевизна материалов, возможность электронного управления характеристиками ударной волны без изменения геометрических параметров элементов устройства.

Активными элементами пьезоэлектрических преобразователей ультразвука являются пьезоэлементы - деталь из специального пьезоэлектрического материала с нанесенными на него электродами для включения в электрическую цепь.

К пьезоматериалам (или к пьезоэлектрикам) относятся диэлектрические материалы, в которых возникает электрическое поле в ответ на приложение механического напряжения (т. н. прямой пьезоэффект). При этом, возможен и, т. н., обратный пьезоэффект - когда механические напряжения возникают в ответ на приложение к материалу электрического поля [1]. Пьезоэффект возникает в определенных типах твердых материалов, таких как кристаллы, керамика, полимеры и биологическая материя (костная ткань, ДНК и различные белки) [2].

Пьезоэлектрический эффект связан с возникновением электрических дипольных моментов в твердых телах. Последние могут либо индуцироваться для ионов на участках кристаллической решетки с асимметричным расположением ионов (как в титанате бария (BaTiO_3) и системе цирконата-титаната свинца (ЦТС)), т. е. в кристаллических материалах без инверсионной симметрии [3]. Либо дипольные моменты могут быть индуцированы непосредственно молекулярными группами (как в тростниковом сахаре) [4, 5].

На рисунке 1 показана простая молекулярная модель пьезоэлектрического материала, которая объясняет генерацию электрического заряда в результате действия механического напряжения [6]. В отсутствии какого-либо внешнего механического воздействия на материал, отрицательные и положительные заряды каждой молекулы находятся в состоянии равновесия. В результате появляется электрически нейтральные молекулы (рис. 1 а).

При приложении некоторого давления на материал его кристаллическая структура может деформироваться, вызывая смещение положительных и отрицательных ионов (зарядов) из положений равновесия и порождая диполи (рис. 1 б).

Обращенные друг к другу диполи внутри материала взаимно уравниваются, и на поверхности материала появляется распределение связанного заряда - материал поляризуется (рис. 1 в). Эта поляризация генерирует электрическое поле и может быть использована для преобразования механической энергии, используемой при формировании материала, в электрическую энергию [7].

Целью данного обзора является определение вида пьезоэлектрического материала, наиболее подходящего для изготовления пьезоэлектрических преобразователей ультразвука в аппаратах УВТ.

Общее описание пьезоэлектрических материалов

Материалы, обладающие выраженным пьезоэлектрическим эффектом, делятся на три основные группы:

- 1) природные и синтетические кристаллы;
- 2) пьезокерамика (поликристаллический поляризованный неорганический материал);
- 3) полимеры.

Природные пьезоэлектрические материалы — это кристаллы, такие как кварц (SiO_4), соль Рошели, минералы турмалиновой группы, Топаз, тростниковый сахар и некоторые органические вещества, такие как шелк, дерево, эмаль, дентин, кость, волосы, некоторые типы резин. В атомной структуре этих материалов изменение положения атомов из-за приложенного напряжения приводит к образованию чистых дипольных моментов, которые вызывают поляризацию и электрическое поле соответственно [8].

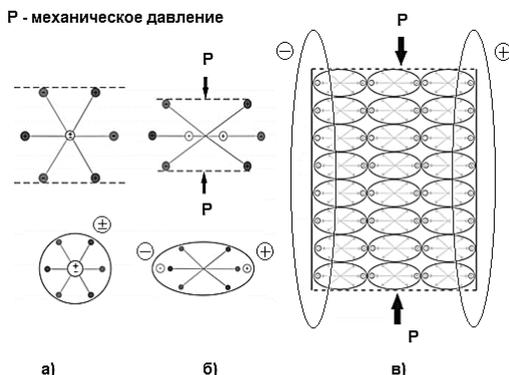


Рисунок 1. Простая молекулярная модель пьезоэлектрического материала: а) электрически нейтральная молекула, б) образование диполей, в) поляризация материала (по материалам работы [6])

Применение природных пьезоэлектрических кристаллических материалов в промышленном производстве компонентов электронной техники весьма ограничено. Для промышленной технологии весьма важным является повторяемость свойств исходных кристаллических материалов, а все природные кристаллы сугубо индивидуальны. Кроме того, потребности современной техники в кристаллах огромны как по объемам, так и по номенклатуре кристаллов и удовлетворить их добычей природного сырья невозможно [9].

С 1935 года предпринимались попытки получения пьезоэлектрических кристаллов, которые могли бы заменить кварц. Были разработаны пьезоэлектрические кристаллы, такие как соли аммония и калия ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ – ADP, KH_2PO_4 – KDP), тартрат этилендиамина (EDT), тартрат дикалия (DKT) и моногидрат сульфата лития (LN). Многие из этих материалов больше не используются в связи с разработкой и производством искусственного кварца, сегнетоэлектрических кристаллов или пьезокерамики. За исключением кварца, в пьезоэлектрических устройствах используется мало монокристаллов. Популярными вариантами являются LiNbO_3 , LiTaO_3 .

Для монокристаллов характерна анизотропия, т. е. проявление различных свойств материала в зависимости от среза материалов и ориентации кристаллографических осей [1,10]. Так, например, величина относительного удлинения бруска из пьезоэлектрического монокристалла кварца (вырезанного особым образом - X-срез) при воздействии электрического поля напряженностью $10\,000\text{ В/м}$ составляет $2,25 \times 10^{-6}$.

Для бруска из пьезокерамики (поликристаллического материала) величина относительного удлинения может быть на два-три порядка больше при аналогичном электрическом поле и, при этом, форма поперечного сечения бруска значения не имеет [1].

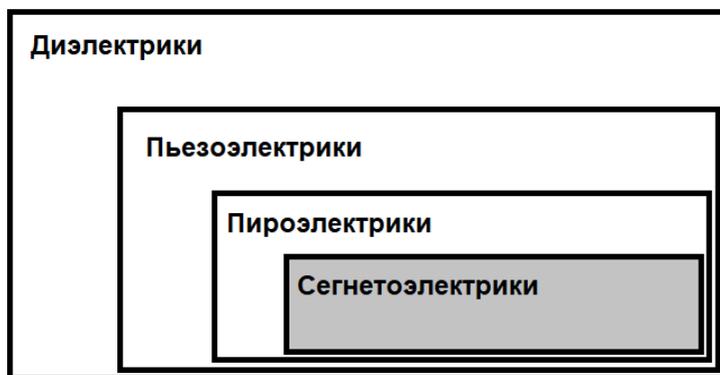
Открытие сильных пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектрической керамики было важной вехой в применении пьезоэлектричества. Сегнетоэлектрическая керамика является наиболее распространенным пьезоэлектрическим материалом в современных инженерных приложениях. Среди них наиболее популярными материалами являются поликристаллические керамики, такие как титанат бария (BaTiO_3) и титанат цирконата свинца (ЦТС), в частности, из-за низких производственных затрат и почти произвольных возможностей формообразования по сравнению с монокристаллическими пьезоэлектриками. Кроме того, они обладают выдающимися пьезоэлектрическими и диэлектрическими свойствами, что делает их особенно незаменимыми в области исполнительных механизмов [11].

Сегнетоэлектрические материалы — это наиболее перспективный класс пьезоэлектриков для изготовления функциональной керамики.

Поляризация сегнетоэлектриков нелинейно зависит от электрического поля, и ее направление может быть изменено внешним воздействием. У сегнетоэлектриков спонтанная поляризация существует только в определенном интервале температур (т.н. сегнетоэлектрическая фаза).

Сегнетоэлектрическая фаза наблюдается (у большинства сегнетоэлектриков) при температурах ниже критической, т.н. температуры Кюри - выше этой температуры спонтанная поляризация не наблюдается. Все сегнетоэлектрики в сегнетоэлектрической фазе обладают пирозэффектом – явлением изменения спонтанной поляризации диэлектрического кристалла при изменении его температуры.

Таким образом, наиболее перспективные пьезоматериалы – сегнетоэлектрики относятся к диэлектрикам, обладающим пьезоэлектрическими свойствами и нелинейным пирозэффектом (рис. 2) [1].



**Рисунок 2. Классификация диэлектрических материалов
(по материалам работы [1])**

Сегнетоэлектрик титанат цирконат свинца (ЦТС) имеет структуру перовскита. Общая химическая формула кристаллической структуры перовскита - ABO_3 , где позицию А занимают более крупные ионы металла, (для ЦТС – свинец, для ВТ – барий), В-более мелкие ионы металла (для ЦТС – титан и цирконий, для ВТ – титан). Структура перовскита является простейшей схемой, в которой кислородные октаэдры соединены вместе в регулярном кубическом массиве с меньшими катионами, занимающими центральную октаэдрическую В-позицию, и более крупными катионами, заполняющими промежутки между октаэдрами в большей А- позиции. На рис. 3 показана кристаллическая структура $BaTiO_3$ при температуре выше и ниже точки Кюри (T_C) [6].

Пьезокерамика не обладает макроскопическим пьезоэлектрическим поведением, хотя отдельные монокристаллические зерна обладают пьезоэлектрическими характеристиками. Спонтанная поляризация должна быть создана внешним электрическим полем: сегнетоэлектрическая керамика должна быть искусственно поляризована сильным электрическим полем, в то время как материал нагревается выше точки Кюри, а затем медленно охлаждается под действие приложенного электрического поля. При сохранении остаточной поляризации материал проявляет макроскопический пьезоэлектрический эффект [12].

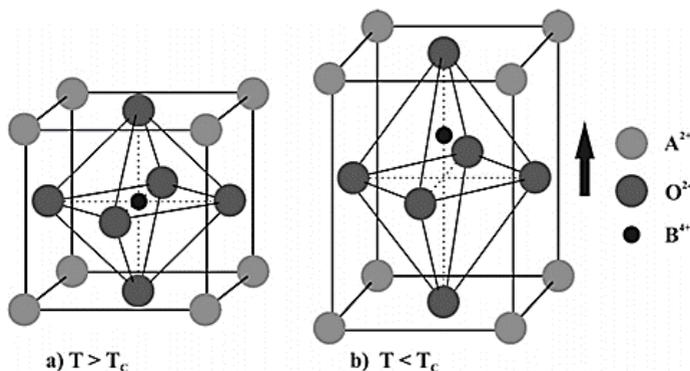


Рисунок 3. Кристаллическая структура традиционной пьезоэлектрической керамики ($BaTiO_3$) при температуре а) выше точки Кюри, б) ниже точки Кюри [6]

Поляризация представляет собой процесс генерации остаточной поляризации в поликристаллическом материале путем приложения достаточно высокого электрического поля. Когда электрическое поле приложено к сегнетоэлектрическому материалу, микроскопические сегнетоэлектрические домены ориентируются в направлении приложенного поля. По мере того, как электрическое поле увеличивается, все больше и больше доменов ориентируются и, при достаточно высоком электрическом поле, почти все домены находятся в одном направлении, что приводит к образованию одного “большого” домена. Материал в этом состоянии обладает максимальной поляризацией и, следовательно, проявляет макроскопические пьезоэлектрические свойства. Если материал поддерживается при высокой температуре (близкой к температуре Кюри) во время приложения электрического поля, ориентация доменов облегчается [1, 6]. Ориентация доменов в процессе поляризации показана на рисунке 4.

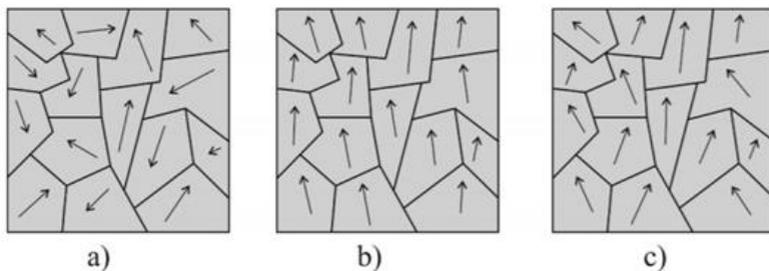


Рисунок 4. Поляризация пьезоэлектрического материала:
а) домены произвольно ориентированы - неполяризованное
состояние материала; б) домены ориентированы в направлении
приложенного электрического поля; в) релаксация остаточной
поляризации вследствие старения [6]

Среди функциональных керамических материалов значительную долю занимают сегнетоэлектрические керамические материалы (или ферроэлектрики) [13], благодаря своим пьезоэлектрическим и диэлектрическим свойствам [14]. На их основе выпускается множество устройств для различных областей применения: пьезоэлектрические детонаторы, излучатели ультразвука огромной мощности, миниатюрные трансформаторы, пьезокерамические фильтры, топливные форсунки дизельных двигателей, гидролокаторы, и т. д. До недавнего времени, наиболее востребованными для этих целей являлись материалы семейства титаната – цирконата свинца (ЦТС) [15], отличающиеся высоким комплексом пьезоэлектрических свойств. Однако, токсичность оксида свинца и связанные с ней экологические проблемы утилизации изделий привели к необходимости поиска новых бессвинцовых функциональных керамических материалов. Данная тенденция была подтверждена на уровне нормативных актов [16] по запрещению использования токсичных материалов в производстве электронных компонентов. Хотя и были отмечены значительные достижения в этом направлении как в поиске подходящих материалов [17] так и в разработке и внедрении технологий изготовления устройств на основе бессвинцовой пьезокерамики [18] полного перехода от ЦТС керамики к бессвинцовым пьезокерамическим материалам (ПКМ) к настоящему времени не произошло.

В качестве замены ЦТС для изготовления пьезокерамических устройств наиболее часто рассматриваются бессвинцовые неорганические материалы, которые можно разделить на три группы [18].

Первая группа бессвинцовых ПКМ основана на BaTiO_3 (BT) [19]. Который, в чистом виде не обладает достаточно высоким комплексом пьезоэлектрических свойств (средняя величина пьезомодуля d_{33} не превышает 190 (pC/N), температура Кюри находится в диапазоне между 120 и 130 °C [20]), чтобы выступать в качестве полноценной замены ЦТС керамики. Титанат бария в основном используется для изготовления конденсаторов и устройств хранения энергии [21]. Но посредством текстурирования и/или допирования пьезоэлектрические свойства титаната бария могут быть значительно улучшены и приближены к свойствам ЦТС керамики [22]. Учитывая относительно низкую стоимость титаната бария и наличие отработанных технологических маршрутов изготовления керамики, титанат бария может быть использован в качестве модельной системы для изучения путей развития бессвинцовых ПКМ.

Вторую группу бессвинцовых ПКМ составляют твердые растворы на основе ниобатов натрия-калия, т.н. система KNN [18]. Керамика на основе KNN рассматривается многими исследовательскими группами в качестве перспективного бессвинцового материала, альтернативного ЦТС. Пьезоэлектрические свойства системы лежат в диапазоне 80-160 (pC/N) [23,24]. Эта система имеет преимущество высокой температуры Кюри, превышающей 400C. Что делает KNN пригодным материалом для изготовления устройств для широкого диапазона рабочих температур. Высокая химическая инертность и совместимость с тканями организма человека делают материалы на основе KNN перспективными для медицинских применений. Их высокие коэффициенты электромеханической связи и низкая диэлектрическая проницаемость (и следовательно высокая добротность) открывают возможность применения в ультразвуковой технике. Начиная с 2005 года, после работ [25, 26] число публикаций, посвященных KNN, фактически превысило количество работ по всем остальным бессвинцовым ПКМ. Недостатками системы KNN является следующее: испарение щелочных оксидов при высокой температуре, нестабильность фазы KNN при температуре выше 1140C, низкая относительная плотность, достигаемая при традиционном свободном спекании. Для преодоления данных ограничений применяются допирование и оптимизация технологий синтеза материала и изготовления плотной керамики [27,28]. Например, в результате многокомпонентного допирования в работе [29] авторы получили материал с $d_{33} = 490\text{pC/N}$ и $T_c=227\text{C}$.

В работе [30] продемонстрирована возможность получения небольших (~ 5мм) монокристаллов KNN. Этот материал обладает набором уникальных свойств: величина пьезомодуля $d_{33} \sim 690\text{pC/N}$,

$T_c=432\text{C}$. Разработка промышленной технологии синтеза такого материала может существенным образом сказаться на рынке пьезоматериалов, потеснив материалы семейства ЦТС.

Третья группа – сегнетоэлектрики на основе титаната натрия висмута ($\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$) (BNT) [31,32] получили широкую известность в первую очередь благодаря высокой температуре Кюри (T_c около 320C) [33], а также благодаря пьезосвойствам некоторых твердых растворов на основе BNT [34,35]. Однако, дополнительным лимитирующим фактором для керамики данной группы является т.н. температура деполяризации (T_d), максимум которой составляет около 290C . Кроме того, большинство допирующих элементов, применяющихся для модификации пьезоэлектрических свойств керамики на основе BNT, вызывают снижение T_d [36]. Следует отметить, что керамика на основе BNT имеет один дополнительный фазовый переход ниже температуры Кюри, температура этого перехода (температура деполяризации T_d) обычно ниже 200C . Деполяризация, происходящая во время этого фазового перехода, приводит к некоторому незначительному снижению пьезоэлектрических свойств. В дополнение к этому недостатку следует отметить ряд недостатков, характерных для керамики на основе BNT. Высокие значения коэрцитивного поля и высокая проводимость препятствуют правильной поляризации, поэтому полная реализация пьезоэлектрических свойств невозможна. Таким образом, ПКМ на основе BNT вплоть до настоящего времени не смогли успешно заменить пьезокерамику на основе ЦТС. В последнее время был проведен ряд исследований, направленных на изучение эффекта допирования. Сравнительно небольшое количество таких допирующих элементов и соединений, как Ba, Pb, Ca, и т. д. (катионные модификаторы) были введены в BNT-керамику, было показано, что данная модификация дает возможность преодолеть вышеописанные недостатки [37].

Помимо вышеназванных распространенных типов бессвинцовых ПКМ, в качестве альтернативы ЦТС материалам рассматриваются и другие пьезоматериалы, в том числе и органические, такие как полимерные пьезоматериалы, такие как поливинилиденфторид (PVDF) [38, 39] и некоторые биополимеры [40]. Пьезоэлектрические свойства PVDF и его сополимеров выражено уступают аналогичным свойствам бессвинцовой пьезокерамики. Биополимеры также имеют относительно низкие пьезоэлектрические характеристики.

Обобщая публикации о бессвинцовых ПКМ, можно отметить значительный прогресс в улучшении пьезоэлектрических характеристик бессвинцовых пьезоэлектрических материалов, достигнутый за счет оптимизации процессов синтеза данных материалов и технологических

процессов изготовления готовых изделий. Тем не менее, устройства из бесвинцовых пьезоэлектрических материалов по многим характеристикам уступают устройствам из ЦТС керамики. Например, керамика на основе ВТ обладает хорошими пьезоэлектрическими свойствами, но имеет низкую температурой Кюри. BNT имеет более высокую температуру Кюри, но его пьезоэлектрические свойства нуждаются в дальнейшем улучшении. KNN имеет сравнительно высокий комплекс пьезоэлектрических свойств, но изготовление плотной керамики из этого материала традиционными методами спекания сопряжено с рядом технологических трудностей. Кроме того, высокая стоимость, связанная с бесвинцовыми пьезоэлектрическими устройствами и/или низкая производительность накладывают серьезные ограничения на их распространение в промышленном производстве [41].

Пьезоэлектрическим материалам для УВТ

На сегодняшний день на рынке представлено большое количество пьезокерамических материалов, предназначенных для использования в различных целях. Применимость пьезоматериала обуславливается его характеристиками, важнейшими из которых для ультразвукового пьезопреобразователя являются:

- пьезоэлектрический модуль d_{nm}
- тангенс угла диэлектрических потерь $\tan(\delta)$
- показатель механической добротности Q_m
- коэффициенты электромеханической связи

В зависимости от направления поляризации пьезокерамического элемента в нем могут возникать как продольные, так и поперечные колебания. На рис. 5 показаны самые распространенные типы пьезокерамических элементов.

Форма пьезоэлемента	Вектор напряженности электрического поля	Направление акустических колебаний
		
		
		
		
		

Рисунок 5. Типы пьезокерамических элементов для ультразвуковых преобразователей

Наиболее удобно с точки зрения использования в приборах УВТ, когда направление поляризации (и управляющего поля) совпадает с направлением распространения акустических волн. Следовательно, материал активного элемента пьезоэлектрического преобразователя должен обладать высоким значением пьезоэлектрического модуля d_{33} , обеспечивающего большую удельную мощность (мощность на единицу объема) акустического сигнала.

Высокий показатель механической добротности Q_m необходим для повышения электроакустической эффективности преобразователя за счет снижения механических потерь и рабочей температуры.

Коэффициент полезного действия колебательной системы напрямую определяется значением коэффициента электромеханической связи.

Снижение тепловых потерь в материале пьезопреобразователя обеспечивается понижением значения тангенса угла диэлектрических потерь $\tan(\delta)$.

В таблице 1 представлены некоторые пьезокерамические материалы, наиболее часто используемые для создания ультразвуковых преобразователей. Здесь же указаны характеристики наиболее перспективных новых материалов.

Таблица 1.

**Основные свойства пьезокерамических материалов
для ультразвуковых преобразователей**

№	Наименование пьезокерамического материала (производитель)	Пьезомодуль d33, пКл/Н	Коэффициент электро-механической связи	Коэффициент диэлектрических потерь $\tan(\delta)$, %	Показатели механической добротности Qm
1	ЦТС-36 (АО «НИИ «Элпа»)	220	0,70	2,5	80
2	ЦТС-46 (АО «НИИ «Элпа»)	450	0,72	2,0	70
2	ЦТС-50 (АО «НИИ «Элпа»)	470	0,73	2,5	80
3	РПС-153 (ООО «Евротек Джeneral»)	600	0.62	30	50
4	НФИ-50 (АО «НИИФИ»)	450±150	-	2,5	80±20
5	НФИ-51 (АО «НИИФИ»)	600±120	-	2,8	70±20
6	НФИ-81 (АО «НИИФИ»)	250±100	-	2,0	900±200
7	ЦТС-19 (Россия) [42,43]	300	0,60	2,8	80
8	ЦТС-26 (Россия) [42,43]	270	0,62	2,0	80
11	PZT-2 (США) [43]	152	0,47	0,5	680
12	PZT-4 (США) [43]	389	0,58	0,4	500
13	PZT-5A (США) [43]	374	0,6	2,0	75
14	PZT-8 (США) [43]	218	0,5	0,4	1000
ppp	KNNS [29]	490			
oo	KNN текстур [17]	420			
pp	KNN кристалл [30]	700			

Видно, что бессвинцовые материалы по своим характеристикам не уступают, а по некоторым параметрам превосходят, традиционным материалам семейства ЦТС. Однако промышленное производство таких материалов отсутствует, ввиду технологической сложности и дороговизне сырья. С другой стороны, наблюдается исключительная проработка технологии по допированию материалов системы ЦТС. Например, за счет небольшого изменения в соотношении титана и циркония, а также введения минимальных добавок легирующих элементов

PZT-4 и PZT-8 существенно отличаются по своим характеристикам от PZT-5A (см. таблица 2). Силовые ультразвуковые устройства, благодаря своим условиям работы в условиях высокого электрического поля и высокой деформации, а также низким потерям, почти наверняка потребуют свойств, которыми обладают пьезокерамические материалы, такие как PZT-4 и PZT-8 и их российские аналоги. Напротив, для устройств ультразвуковой терапии, характеризующихся низкими и средними показателями интенсивности УЗ поля (не более 3 Вт/см²), наиболее подходящим ПКМ можно назвать PZT-5A или его российские аналоги ЦТС-19, ЦТС-46, ЦТС-50.

Таблица 2.

**Характеристики и области применения пьезокерамики,
распространенной в США [42-44]**

Материал	Физические характеристики	Области применения
PZT-4	Высокотвердая пьезокерамика с высоким сопротивлением деполяризации, высокой электромеханической связью, высокой диэлектрической проницаемостью и низкими диэлектрическими потерями при воздействии сильных электрических полей.	Излучающие преобразователи высокой мощности, например, гидролокаторы (сонары).
PZT-5A	Мягкая пьезокерамика с высоким удельным сопротивлением при повышенных температурах, высокой чувствительностью и высокой временной стабильностью свойств.	Неразрушающий контроль, гидрофоны, медицинская диагностика и устройства для УЗ терапии.
PZT-8	Твердая пьезокерамика аналогична PZT-4, но имеет более низкие диэлектрические и механические потери при воздействии сильных электрических полей. Данный материал подходит для применений, требующих более высокой мощности, чем может обеспечить PZT-4.	Силовые ультразвуковые преобразователи.

Выводы

Обобщая данные публикации о бессвинцовых ПКМ, можно отметить значительный прогресс в улучшении пьезоэлектрических характеристик бессвинцовых пьезоэлектрических материалов, достигнутый за счет оптимизации процессов синтеза данных материалов и технологических процессов изготовления изделий из них. Тем не менее, устройства из бессвинцовых пьезоэлектрических материалов по многим характеристикам уступают устройствам их пьезокерамики на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС) (см. табл. 1). Например, керамика на основе титаната бария ($BaTiO_3$) обладает хорошими пьезоэлектрическими свойствами, но имеет низкую температурой Кюри. Керамика на основе титаната натрия висмута ($Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$) имеет более высокую температуру Кюри, но его пьезоэлектрические свойства нуждаются в дальнейшем улучшении. Керамика на основе ниобатов натрия-калия (т. н. система KNN) имеет сравнительно высокий комплекс пьезоэлектрических свойств, но изготовление плотной керамики из этого материала традиционными методами спекания сопряжено с рядом технологических трудностей. Кроме того, высокая стоимость, связанная с бессвинцовыми пьезоэлектрическими устройствами и/или низкая производительность накладывают серьезные ограничения на их распространение в промышленном производстве.

В настоящее время подавляющее большинство типов технологических, медицинских и бытовых ультразвуковых преобразователей оснащены пьезокерамическими активными элементами из керамики на основе ЦТС.

Силовые ультразвуковые устройства (работающие с акустической мощностью в диапазоне $10-30 \text{ Вт/см}^2$), благодаря своим условиям работы в условиях высокого электрического поля и высокой деформации, а также низким потерям, требуют свойств, которыми обладают пьезокерамические материалы, такие как PZT-4 и PZT-8 и их российские аналоги.

Напротив, для устройств ультразвуковой терапии, характеризующихся низкими и средними показателями интенсивности УЗ поля (не более 3 Вт/см^2), наиболее подходящим ПКМ можно назвать PZT-5A или его близкие российские аналоги ЦТС-19, ЦТС-46 или ЦТС-50 (таблица 1).

Список литературы:

1. Головин В.А. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов // В.А. Головин, И.А. Каплунов, О.В. Малышкина, Б.Б. Педько, А.А. Мовчикова – М.: Техносфера. – 2016. – 272 с.

2. Skoog D. A., Holler F. J., Crouch S. R. Principles of instrumental analysis. – Cengage learning, 2017.
3. Gautschi G. Piezoelectric sensors //Piezoelectric Sensorics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. – P. 73-91.
4. Birkholz M. Crystal-field induced dipoles in heteropolar crystals I: concept // Zeitschrift für Physik B Condensed Matter. – 1995. – V. 96. – №. 3. – P. 325-332.
5. Birkholz M. Crystal-field induced dipoles in heteropolar crystals II: Physical significance // Zeitschrift für Physik B Condensed Matter. – 1995. – V. 96. – № 3. – P. 333-340.
6. Sienkiewicz L.K. Concept, implementation and analysis of the piezoelectric resonant sensor / Actuator for measuring the aging process of human skin : дис. – Toulouse, INPT, 2016.
7. Nadal C. Contribution à la conception et la modélisation transformateurs piézoélectriques dédiés à la génération de plasma: дис. – 2011.
8. Campos-Pozuelo C., Gallego-Juárez J. A. Limiting strain of metals subjected to high-intensity ultrasound //Acta Acustica united with Acustica. – 1996. – V. 82. – №. 6. – P. 823-828.
9. Панич А.А., Мараховский М.А., Мотин Д.В. Кристаллические и керамические пьезоэлектрики // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Т. 15. – №. 1.
10. Tichý J. et al. Fundamentals of piezoelectric sensorics: mechanical, dielectric, and thermodynamical properties of piezoelectric materials. – Springer Science & Business Media, 2010.
11. Zhou D. Experimental investigation of non-linear constitutive behavior of PZT piezoceramics. – Bunia : FZKA, 2003.
12. Ballas R.G. Piezoelectric multilayer beam bending actuators: Static and dynamic behavior and aspects of sensor integration. – Springer Science & Business Media, 2007.
13. Lines M.E., Glass A.M. Principles and applications of ferroelectrics and related materials. – Oxford university press, 2001.
14. Uchino K. (ed.). Advanced piezoelectric materials: Science and technology. – Woodhead Publishing, 2017.
15. Haertling G. H. Ferroelectric ceramics: history and technology // Journal of the American Ceramic Society. – 1999. – V. 82. – №. 4. – P. 797-818.
16. Directive E. U. et al. 96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) // Official Journal of the European Union L. – 2002. – V. 37. – P. 24-38.
17. Saito Y. et al. Lead-free piezoceramics //Nature. – 2004. – V. 432. – № 7013. – P. 84.
18. Rödel J. et al. Transferring lead-free piezoelectric ceramics into application // Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – V. 35. – № 6. – P. 1659-1681.

19. Von Hippel A. Ferroelectricity, domain structure, and phase transitions of barium titanate //Reviews of Modern Physics. – 1950. – V. 22. – № 3. – P. 221.
20. Sakayori K. et al. Curie temperature of BaTiO₃ //Japanese journal of applied physics. – 1995. – V. 34. – №. 9S. – P. 5443.
21. Vijatović M.M., Bobić J.D., Stojanović B.D. History and Challenges of Barium Titanate: Part II //Science of Sintering. – 2008. – V. 40. – №. 3.
22. Takenaka T., Nagata H. Current status and prospects of lead-free piezoelectric ceramics //Journal of the European Ceramic Society. – 2005. – V. 25. – №. 12. – P. 2693-2700.
23. Birol H., Damjanovic D., Setter N. Preparation and characterization of (K_{0.5}Na_{0.5})NbO₃ ceramics //Journal of the European Ceramic Society. – 2006. – V. 26. – №. 6. – P. 861-866.
24. Zhang D., Zhang Z. Effects of K excess on the preparation and characterization of (K_{0.5}Na_{0.5})NbO₃ ceramics // Ferroelectrics. – 2014. – V. 466. – №. 1. – P. 8-13.
25. Yasuyoshi S. Lead-free piezoceramics / Yasuyoshi Saito, Hisaaki Takao, Toshihiko Tani, Tatsuhiko Nonoyama, Kazumasa Takatori, Takahiko Homma, Toshiatsu Nagaya, Masaya Nakamura // Nature. - 2004. - V. 432. - P. 84-87.
26. Fuyuno I. Toyota's production line leads from lab to road /I. Fuyuno // Nature. – 2005. – V. 435.– P. 1026-1032.
27. Tarasovskiy V. P. et al. MATERIAL STRUCTURE CONTROL AS ONE OF THE PERSPECTIVE APPROACHES TO OPTIMIZE PHYSICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF PIEZOELECTRIC CERAMIC MATERIALS //Reviews on Advanced Materials Science. – 2017. – V. 51. – №. 1.
28. Ponomarev S. G. et al. Vibrocompaction of Lead-Free Piezoceramic Material Based on Solid Solutions of Potassium and Sodium Niobates / Glass and Ceramics. – 2020. – P. 1-5.
29. Wang X., Wu J., Xiao D., Zhu J., Giant piezoelectricity in potassium-sodium Niobate lead-free ceramics//J. Am. Chem. Soc. 2014. 136. P.2905-2910.
30. Jie Yang, Faqiang Zhang, Qunbao Yang, Zhifu Liu, Yongxiang Li, Yun Liu, Qiming Zhang Large piezoelectric properties in KNN-based lead-free single crystals grown by a seed-free solid-state crystal growth method APPLIED PHYSICS LETTERS 2016.V108, 182904.
31. Dittmer R. et al. Electric-field-induced polarization and strain in 0.94 (Bi_{1/2}Na_{1/2})TiO₃-0.06 BaTiO₃ under uniaxial stress //Acta Materialia. – 2013. – V. 61. – №. 4. – P. 1350-1358.
32. Anton E. M. et al. Determination of depolarization temperature of (Bi_{1/2}Na_{1/2})TiO₃-based lead-free piezoceramics //Journal of Applied Physics. – 2011. – V. 110. – № 9. – P. 094108.

33. Li Y. et al. Dielectric and piezoelectric properties of lead-free (Na_{0.5}Bi_{0.5})TiO₃-NaNbO₃ ceramics //Materials Science and Engineering: B. – 2004. – V. 112. – № 1. – P. 5-9.
34. Hiruma Y. et al. Large electrostrain near the phase transition temperature of (Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO₃-SrTiO₃ ferroelectric ceramics // Applied Physics Letters. – 2008. – V. 92. – № 26. – P. 262904.
35. Zhang S. T. et al. Lead-free piezoceramics with giant strain in the system Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃-BaTiO₃-K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃. I. Structure and room temperature properties //Journal of Applied Physics. – 2008. – V. 103. – № 3. – P. 034108.
36. Reichmann K., Feteira A., Li M. Bismuth sodium titanate based materials for piezoelectric actuators //Materials. – 2015. – V. 8. – № 12. – P. 8467-8495.
37. Zhang Y. et al. Piezoelectric and dielectric properties of Sm₂O₃-doped 0.82Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃-0.18Bi_{0.5}K_{0.5}TiO₃ ceramics //Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – V. 502. – № 2. – P. 341-345.
38. Jana S. et al. The influence of hydrogen bonding on the dielectric constant and the piezoelectric energy harvesting performance of hydrated metal salt mediated PVDF films //Physical Chemistry Chemical Physics. – 2015. – V. 17. – № 26. – P. 17429-17436.
39. Chang C. et al. Direct-write piezoelectric polymeric nanogenerator with high energy conversion efficiency //Nano letters. – 2010. – V. 10. – № 2. – P. 726-731.
40. Ghosh S.K., Mandal D. Sustainable energy generation from piezoelectric biomaterial for noninvasive physiological signal monitoring // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2017. – V. 5. – № 10. – P. 8836-8843.
41. Zheng T. et al. Recent development in lead-free perovskite piezoelectric bulk materials //Progress in materials science. – 2018. – V. 98. – P. 552-624.
42. Богуш М. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. – М.: Техносфера, 2014 – 312 с.
43. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В.М. Шарапова. - Москва: Техносфера, 2006. – 632 с.
44. Mathieson A.C. Nonlinear characterisation of power ultrasonic devices used in bone surgery : дис. – University of Glasgow, 2012.

ВИБРАЦИОННОЕ ФОРМОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА

Скворцов Аркадий Алексеевич

*д-р физ.-мат. наук, проф., ст. науч. сотр.,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"МИРЭА - Российский технологический университет",
РФ, г. Москва*

Пономарев Сергей Григорьевич

*канд. физ.-мат. наук, инженер,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"МИРЭА - Российский технологический университет",
РФ, г. Москва*

Васин Александр Александрович

*канд. техн. наук, инженер, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"МИРЭА - Российский технологический университет",
РФ, г. Москва*

Резниченко Александр Владимирович

*инженер, Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"МИРЭА - Российский технологический университет",
РФ, г. Москва*

*Данное исследование выполняется при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по
соглашению № 05.604.21.0220 (уникальный номер RFMEFI60419X0220),
прикладные научные исследования проводятся по теме «Разработка
отечественного аппарата ударно-волновой терапии на основе пьезо-
электрического аппликатора с изменяемой пространственной
геометрией пятна фокусировки и энергией ударной волны».*

Аннотация. Рассматривается возможность получения керамических элементов пьезоэлектрического аппликатора с помощью вибрационного формования. Рассматриваются как традиционные

материалы семейства титаната цирконата свинца тик и перспективные бессвинцовые сегнетоэлектрики семейств ниобата калия натрия, титаната бария. Проведено исследование степени уплотняемости порошка со средним размером частиц 1 - 2 мкм от частоты колебаний в диапазоне 50 – 1100 Гц, и амплитуде колебаний от 10 до 200 мкм. Определены оптимальные условия вибрационного формования образцов. Образцы пьезокерамики, изготовленные с применением вибрационного формования при давлении до 1.3 МПа по своим характеристикам аналогичны образцам керамики, полученным статическим прессованием при давлении 100 - 150 МПа.

Ключевые слова: ударно-волновая терапия, пьезоэлектрический аппликатор, ниобат калия натрия, титанат бария, титанат цирконат свинца, прессование, вибрационное формование.

Введение

В последнее время наблюдается стремительное развитие применения ударно-волновой терапии (УВТ) для лечения широкого круга заболеваний.

Основным рабочим элементом аппарата УВТ является генератор ударной волны - аппликатор. В зависимости от способа формирования (пьезоэлектрический, электрогидравлический, электромагнитный, пневматический) ударной волны меняется и конструкция аппликатора. Наиболее перспективным в настоящее время считается пьезоэлектрический аппликатор, который позволяет реализовать наиболее гибкое управление параметрами ударной волны, за счет управления каждым отдельным элементом. Это устройство состоит из системы элементарных пьезоизлучателей цилиндрической формы, для изготовления которых используют пьезокерамику на основе титаната цирконата свинца (PZT). Этот материал обладает наилучшими пьезоэлектрическими характеристиками при умеренных температурах и, следовательно, он наиболее предпочтителен при изготовлении преобразователей энергии. Однако принятые в недавнем времени экологические ограничения [1] по использованию токсичных элементов (в том числе и свинец) предполагают переход в скором времени к бессвинцовым пьезоматериалам. К таким материалам относятся составы на основе ниобатов калия натрия и титаната бария. Эти материалы также как и PZT относятся к семейству перовскитов, но обладают большей биосовместимостью чем PZT [2]. Кроме того в последнее время наблюдается заметный прогресс в улучшении параметров бессвинцовых ПКМ, которые становятся соразмерными с PZT [3].

Для формования простых керамических изделий, как правило, применяют статическое прессование увлажненных порошков. Порошковая масса под действием давления (от 50 до 200 МПа) превращается в компактную заготовку за счет прилипания, механического зацепления или склеивания частиц порошка друг с другом. При этом в теле заготовки возникают области повышенных напряжений. После снятия нагрузки возможно неравномерное расширение деформированных объемов частиц, что может стать причиной появления различных дефектов.

Вибрационное воздействие на порошковые массы позволяет существенно уменьшить нагрузки необходимые для уплотнения и структурирования материала при формовании изделий. Это позволяет уменьшить расходы на инструмент и увеличить плотность изделий. Уплотнение влажной шихты происходит вследствие вызываемого вибрацией повышения текучести смеси, т. е. снижения диссипативных сопротивлений сдвиговым деформациям под действием сил, имеющих постоянное направление [4]. Поэтому сравнительно небольшого внешнего давления оказывается достаточным для удаления воздуха и жидкости из формовочной массы, что обеспечивает более плотную упаковку частиц порошка. Основными параметрами, влияющими на уплотняемость порошковых масс, являются: время воздействия вибрации, амплитуда и частота колебаний, а так же внешняя сжимающая сила [5, 6].

Целью работы являлось сравнение двух методов формования (статическое прессование и вибрационное формование) заготовок УЗ излучателей из пьезокерамических материалов (ПКМ) со структурой перовскита. Помимо промышленно выпускаемого ПКМ семейства PZT, рассматривались бессвинцовые материалы со структурой перовскита: титанат бария (BT) и ниобат калия натрия (KNN). Эти соединения являются типичными представителями бессвинцовых ПКМ, спрос на которые в ближайшей перспективе будет только нарастать.

Материалы и оборудование

Порошки KNN и BT были синтезированы с помощью твердофазного метода и гидротермального метода соответственно [7, 8]. Исходными реагентами являлись измельченные порошки карбонатов натрия, калия, бария и оксиды ниобия и титана. Для улучшения процесса спекания и повышения плотности керамики материал KNN модифицировали ионами Sr^{2+} (2мас%), который является донором в А-подрешетке перовскита. Гидротермальный синтез порошка титаната бария проводился при следующих условиях: температура синтеза 400°C, давление 26МПа. Все порошки после синтеза подвергались механической активации в планетарной мельнице в течении одного часа

в среде этанола. Средний размер частиц синтезированных порошков составлял 1,0 - 2,0 мкм [9]. В качестве модельного порошка семейства PZT использовался материал близкий по составу к ЦТС 19 (ООО ЭЛПА, Россия), полученный методом твердофазного синтеза. Этот материал имел аналогичные гранулометрические характеристики.

Для примера на рисунках 1 и 2 приведены гранулометрические кривые для порошка ВТ и микрофотография его частиц соответственно. Наличие в порошке частиц субмикронных и нанометровых размеров позволяет надеяться на получение более плотных керамических изделий, что приводит к увеличению пьезоэлектрического эффекта [10].

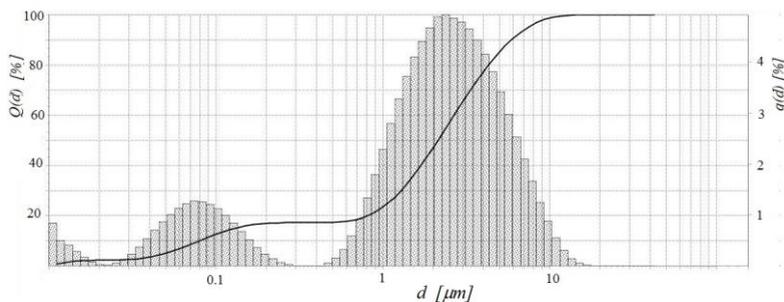


Рисунок 1. $Q(x)$, $q(x)$ – интегральная и дифференциальная функции распределения по размерам частиц порошка ВТ

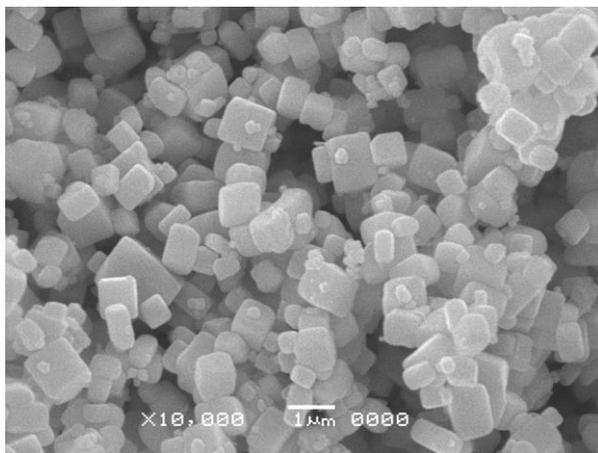


Рисунок 2. СЭМ фотография порошка ВТ

Размер частиц определялся методом лазерной дифракции на приборе «ANALYSETTE 22» NanoTec plus Fritch. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре ALR X'TRA фирмы Thermo-Fisher Scientific (Швейцария) с медным анодом (CuK α). Морфология кристаллов анализировались с помощью сканирующего JSM-6390LA электронного микроскопа фирмы JEOL Ltd., Japan.

Для проведения испытаний по вибрационному формованию порошков использовался электродинамический вибростенд S061-230M SPA602 ACU402 Sonic Dynamesc. Пресс форма с исследуемым порошком закреплялась над вибростендом, так что нижний пуансон опирался на вибрирующую площадку (см. рисунок 3). Сверху на слой порошка устанавливался верхний пуансон, на который монтировался дополнительный груз.

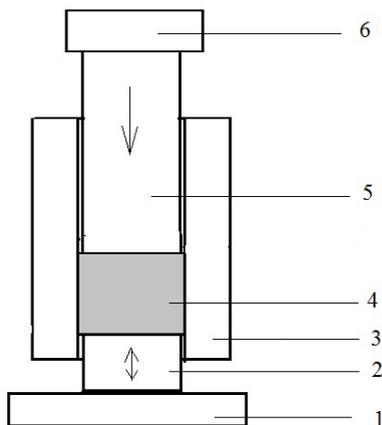


Рисунок 3. Схема приспособления для виброкомпактирования порошков. 1 – вибростенд, 2 – нижний пуансон, 3- корпус, 4 – порошок, 5 – верхний пуансон, 6 - дополнительный груз

Таким образом, нижний пуансон оказывал вибрационное воздействие на порошок, а статическое нагружение осуществлялось за счет веса верхнего пуансона с грузом. Для одной и той же массы порошка определялась высота слоя порошка, как для свободной засыпки (L_0) так и при различных режимах виброуплотнения L_f . По этим измерениям определялась величина степени уплотняемости порошка [11]:

$$\delta = (1 - L_f/L_0) \cdot 100\% . \quad (1)$$

Для обожженных образцов керамики методом гидростатического взвешиванием определялась плотность ρ и открытая пористость Π . В дальнейшем использовалась величина относительной плотности ρ^* - отношение плотности образца ρ к теоретической плотности материала. Диэлектрическая проницаемость ϵ , тангенс диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ определялись с помощью емкостного метода на приборе LRC-78110G Gwinstek, пьезоэлектрические характеристики определялись квазистатическим методом на приборе d_{33} -meter YE2730A AP.

Результаты исследований

Проводилось исследование степени уплотняемости δ сухих и увлажненных порошков от частоты колебаний f в диапазоне 50 – 1100 Гц, амплитуде колебаний A от 10 до 200 мкм и внешнего давления P от 0,03 МПа до 1,3 МПа. Так для примера, на рисунке 4 показано влияние основных параметров виброкомпактирования на уплотняемость порошка KNN. Аналогичные кривые получались для всех рассматриваемых материалов. При увеличении значений частоты f , амплитуды колебаний A и внешнего давления P происходит увеличение δ . Видно что изменение частоты приводит к более существенному изменению δ . Кроме того наблюдалось псевдооживление порошков при частотах более 400 Гц. Этот эффект удастся нивелировать, увеличением внешнего давления на порошок. Оказалось, что при использовании виброформования с частотой 400 Гц, амплитудой колебаний $A=100$ мкм и внешнего давления 0,3 – 1,0 МПа удастся получать заготовки с плотностью не ниже чем при использовании статического прессования при давлении 100 МПа.

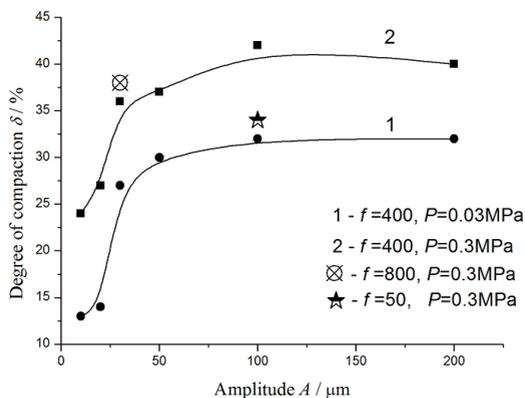


Рисунок 4. Влияние основных параметров виброкомпактирования на степень уплотняемости порошка материала KNN

На основе указанных выше материалов были приготовлены три партии пресспорошков. В сухой порошок вводилось в качестве временного связующего 5 масс% парафина. Заготовки формовались с помощью виброформования при давлении 0,3МПа и 1,3 МПа. При этом все полученные образцы имели прочность на сжатие не ниже 5 МПа, что является достаточным условием для дальнейших манипуляций [12].

Образцы, сформованные с помощью вибровоздействия и статическим прессованием спекались при температуре 1120°C для KNN, 1300°C для ВТ и 1260°C для PZT. В таблице 1 приведены основные характеристики спеченных образцов. Для сравнения указаны данные полученные ранее другими авторами. Видно, что при указанных параметрах, спеченные образцы, полученные с помощью виброформования, по своим характеристикам ничем не отличались от образцов, полученных методом статического прессования при давлении 100 МПа.

Таблица 1.

Влияние параметров виброуплотнения на свойства керамики

Материал	Частота f , Гц	Амплитуда A , мкм	Открытая пористость Π , %	Относительная плотность, ρ^* , %	ϵ	$tg\gamma$	d_{33} , пК/В
KNN	400	100	7	88	600	0,03	110
	400	200	4	89	640	0,03	120
	Статическое прессование 100МПа		4	89	630	0,03	117
	Данные из работы [13]			91	870	0,03	80
ВТ	50	100	0.5	93	1250	0,03	79
	Статическое прессование 150МПа		0.5	94	1270	0,02	80
	Данные из работы [14]		--	97	1223	0,02	82
PZT	50	100	0.2	94	1680	0,02	360
	Статическое прессование 150МПа		0.1	95	1700	0,02	380

Обсуждение и заключение

Показано влияние параметров вибрационного уплотнения на формирование порошков ПКМ. Установлено, что для порошка со средним размером частиц 1 - 2 мкм оптимальными условиями виброформования являются следующие значения: частота колебаний 200 – 400 Гц, амплитуда колебаний 100 – 200 мкм, давление 0,3 – 1,3 МПа. При этих условиях формования, возможно, получать образцы – полуфабрикаты с плотностью не ниже чем при статическом прессовании с давлением порядка сотни единиц МПа. Образцы пьезокерамики, полученные методом статического прессования при давлении 100 МПа и виброформованием, при указанных выше условиях, имеют близкие значения диэлектрических и пьезоэлектрических величин. То есть метод виброформования позволяет получать пьезокерамические изделия цилиндрической формы, пригодные для использования в виде элементарных излучателей акустических волн. При этом, величина давления прессования снижается на два порядка, что существенно уменьшает стоимость производственной оснастки и количество дефектных изделий по сравнению с традиционным способом формования. Отметим, что, по-видимому, данные выводы можно отнести и к другим аналогичным порошкам, имеющим ту же дисперсность. Как видно из таблицы 1 материал PZT имеет больший пьезоэлектрический эффект, однако в ближайшем будущем этот материал может оказаться под запретом, что выдвинет на ведущее место бессвинцовые ПКМ семейства KNN и VT.

Список литературы:

1. Directive 2002/95/EC of the european parliament and of the council of 27 January 2003 //Official Journal of the European Union. 2003. V.37. 19.
2. Jaffe B., Cook W. R., Jaffe H. Piezoelectric ceramics Academic Press; London, New York, 1971.
3. Wang X., Wu J., Xiao D., Zhu J., Giant piezoelectricity in potassium-sodium Niobate lead-free ceramics//J. Am. Chem. Soc., 2014, 136, P.2905-2910.
4. И.И. Блехман Вибрационная механика –М.: Физматлит 1994 с. 400 Blekhman I.I. Vibrational Mechanics. Moscow, Fizmatlit, 1994. (in Russian).
5. Шаталова И.Г., Горбунов Н.С., Лихтман В.И. Физико-химические основы вибрационного уплотнения порошковых материалов. М. Наука, 1965. - 163с. Shatalova I.G., Gorbunov N.S., Lihtman V.I. Physics and Chemistry of Vibratory Compacting of Powder Materials. Moscow, Nauka, 1965. (in Russian).
6. J. Auziņš, A. Januševiskis, A. Kovačska, O. Ozoliņš Experimental identification and optimization of the concrete block vibropressing process. Vibromechanika. Journal of vibroengineering. March 2010. Volume 12, issue 1. P.1-11.

7. S.G. Ponomarev, V.P. Tarasovskii, V.V. Rybal'chenko, V.I. Koshkin, A.A. Vasin, A.D. Smirnov. Anomalous thermal expansion in solid-phase synthesis of piezoceramic material based on solid solutions of potassium and sodium niobates. *Glass and Ceramics*, 2017. V.74. N.11 – 12. P.440 -443.
8. A.A. Kholodkova, M.N. Danchevskaya, Yu.D. Ivakin, G.P. Muravieva, A.D. Smirnov, V.P. Tarasovskii, S.G. Ponomarev, A.S. Fionov, V.V. Kolesov Properties of barium titanate ceramics based on powder synthesized in supercritical water. *Ceramics International*. 2018. V. 44. P. 13129-13138.
9. S.G. Ponomarev, A.A. Vasin, V.P. Tarasovskiy, A.V. Smirnov, V.V. Reznichenko, O.L. Sidortsova Kinetics of grinding precursor powders for piezoceramic materials based on potassium and sodium niobate systems. *Amazonia Investiga*. 2018. V.7(17). P.211-218.
10. S.G. Ponomarev, V. P. Tarasovskii, A. V.Reznichenko, A. A. Vasin Influence of the powder grain size on dielectric and piezoelectric properties of lead-free $K_xNa_{1-x}NbO_3$ piezoelectric ceramics // *Ferroelectrics*. 2019. V.539. P.94-97.
11. S.G. Ponomarev, A.V. Smirnov, A.V. Reznichenko, A.A. Vasin, V.P. Tarasovskii, A.D. Shlyapin, I.S. Solov'ev Vibrocompacting of lead-free piezoceramic powder material based on solid solutions of potassium and sodium niobates *Glass and Ceramics*, 2019. N.9. P.31 -36 (in Russian)
12. K.Okadzaki Ceramic engineering for dielectrics. Tokyo, 1969.
13. Jitka Hrescak, Goran Drazi, Marco Delucad, Iztok Arconf, Alojz Kodref, Monica Dapiaggii, Tadej Rojaca, Barbara Malica, Andreja Bencana Donor doping of $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$ ceramics with strontium and its implications to grain size, phase composition and crystal structure *Journal of the European Ceramic Society*. 2017. T.37. P.2073–2082.
14. C.N. George, J.K. Thomas, H.P. Kumar, M.K. Suresh, V.R. Kumar, P.R.S. Wariar, R. Jose, J. Koshy, Characterization, sintering and dielectric properties of nanocrystalline barium titanate synthesized through a modified combustion process// *Mater. Charact*. 2009. V.60. P.322–326.

РАЗДЕЛ 2.

МАТЕМАТИКА

2.1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА

ПОКАЗАТЕЛЬНЫЕ НЕРАВЕНСТВА В КУРСЕ МАТЕМАТИКИ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЙ

Тюренков Александр Алексеевич

*учитель математики и ИКТ, МОУ Софьинска СОШ,
РФ, Раменский г.о., с. Софьино*

Аннотация. В статье рассмотрены простейшие показательные неравенства в курсе математики средней школы и методы их решений. Продемонстрированы примеры применения данных методов так, чтобы все участники образовательного процесса смогли понять и применить их в практической деятельности.

Ключевые слова: математика, простейшие показательные неравенства, методы решения показательных неравенств.

Введение. В школьном курсе математики большое внимание уделяется решению неравенств различных типов, в том числе показательных. Обучающиеся знакомятся с показательными неравенствами в старших классах после изучения свойств показательной функции. Задания по теме «Показательные неравенства» включены в контрольно-измерительные материалы ЕГЭ по математике как базового, так и профильного уровня. При решении показательных неравенств учащиеся часто допускают ошибки, многие из которых объясняются: неверным выбором метода решения, выполнением преобразования, приводящего к неравенству, не равносильному исходному; решением другого неравенства, полученного из исходного неравенства с помощью некоторой замены переменной. При этом исходное неравенство осталось не решенным.

Соответствующие умения, позволяющие не допустить ошибки в решении неравенства, формируются на уроках математики при выполнении большого количества разнообразных упражнений.

Простейшие показательные неравенства

Данные показательные неравенства представлены в курсе алгебры средней школы. Рассмотрим их решения.

Пусть a – данное положительное, не равное 1 число, b – данное действительное число. Тогда неравенства $a^x > b$ и $a^x < b$ называют простейшими показательными неравенствами.

Например, неравенства $2^x < 3$, $\left(\frac{1}{3}\right)^x > \sqrt[4]{3}$, $25^x < -25$ являются простейшими показательными неравенствами.

Поскольку $a^{x_0} > 0$ для любого действительного числа x_0 , то при $b \leq 0$ неравенство $a^x > b$ справедливо для любого действительного числа x_0 , но нет ни одного действительного числа x_0 , для которого было бы справедливо числовое неравенство $a^x < b$ или числовое равенство $a^x = b$.

Таким образом, если $b \leq 0$, то множество всех решений неравенства $a^x > b$ есть интервал $(-\infty; +\infty)$, а неравенство $a^x < b$ решений не имеет.

Если же $b > 0$, то неравенства $a^x > b$ и $a^x < b$ можно переписать в виде $a^x > a^{x_0}$ и $a^x < a^{x_0}$, где $x_0 = \log_a b$.

Рассмотрим решение неравенств $a^x > a^{x_0}$ и $a^x < a^{x_0}$ сначала при $a > 1$. Так как для такого a функция $y = a^x$ является возрастающей, то для любого числа $x > x_0$ справедливо числовое неравенство $a^x > a^{x_0}$, а для любого числа $x < x_0$ справедливо числовое неравенство $a^x < a^{x_0}$. Кроме того, равенство $a^x = a^{x_0}$ справедливо лишь при $x = x_0$.

Следовательно, при $b > 0$ и $a > 1$ множество всех решений неравенства $a^x > a^{x_0}$ есть интервал $(x_0; +\infty)$, а множество всех решений неравенства $a^x < a^{x_0}$ есть интервал $(-\infty; x_0)$, где $x_0 = \log_a b$.

Пусть теперь $0 < a < 1$. Так как, для такого a функция $y = a^x$ является убывающей, то для любого числа $x > x_0$ справедливо числовое неравенство $a^x < a^{x_0}$, а для любого числа $x < x_0$ справедливо числовое неравенство $a^x > a^{x_0}$. Кроме того, равенство $a^x = a^{x_0}$, справедливо лишь при $x = x_0$.

Таким образом, при $b > 0$ и $0 < a < 1$ множество всех решений неравенства $a^x > a^{x_0}$ есть интервал $(x_0; +\infty)$, а множество всех решений неравенства $a^x < a^{x_0}$ есть интервал $(-\infty; x_0)$, где $x_0 = \log_a b$. Рассмотрим примеры.

Пример 1. Решите неравенство $2^x < 8$.

Решение. Пользуясь тем что $8 = 2^3$, преобразуем наше неравенство $2^x < 2^3$.

Так как основание $2 > 1$, то функция $y = 2^x$ является возрастающей. Поэтому решением неравенства, является множество решений $x < 3$.

Ответ: $(-\infty; 3)$.

Пример 2. Решите неравенство $\left(\frac{1}{3}\right)^x < 5$.

Решение. Чтобы решить неравенство нам нужно уравнять основания, для этого представим 5, как $5 = \left(\frac{1}{3}\right)^{\log_{\frac{1}{3}} 5}$. После преобразования получим $\left(\frac{1}{3}\right)^x < \left(\frac{1}{3}\right)^{\log_{\frac{1}{3}} 5}$;

Так как $0 < \frac{1}{3} < 1$, то функция $y = \left(\frac{1}{3}\right)^x$ является убывающей. Поэтому решением данного неравенства является $x > \log_{\frac{1}{3}} 5$, т.е. мы поменяли знак на противоположный.

Ответ: $(\log_{\frac{1}{3}} 5; +\infty)$.

Пример 3. Решите неравенство $2^x < -1$.

Решение. Так как $-1 < 0$, то наше неравенство не имеет решений.

Ответ: нет решений.

Метод введения вспомогательной переменной

С помощью подстановки $a^{f(x)} = t$, где $t > 0$, неравенство приводится к квадратному неравенству относительно переменной t , либо к другому простейшему неравенству относительно переменной t , изначально решаем относительно переменной t , а затем ищем значение исходной переменной x . Рассмотрим примеры.

Пример 4. Решите неравенство $5^{3x^2-2x-6} < \frac{1}{5}$.

Решение. Вводим новую переменную $t = 3x^2 - 2x - 6$, отсюда наше неравенство примет вид $5^t < 5^{-1}$.

Решив простейшее показательное неравенство получим решение $t < -1$.

Мы решили неравенство относительно переменной t , а нам нужно решить относительно исходной переменной x , для этого поставим $t = 3x^2 - 2x - 6$ в наше неравенство $t < -1$, и получим неравенство $3x^2 - 2x - 6 < -1$.

Решим данное квадратное неравенство, получаем ответ $-1 < x < \frac{5}{3}$, оно и будет являться решением исходного показательного неравенства.

Ответ: $(-1; \frac{5}{3})$

Обычно данные показательные неравенства решаются путем равносильного перехода, но для наглядности детям можно продемонстрировать этот метод.

Метод решения, основанный на разложении на множители

Для детального разбора этого метода необходимо вспомнить все способы разложения на множители.

1. *Вынесение общего множителя за скобку.* Если все члены многочлена имеют общий множитель, то, вынося его за скобки, получим разложение многочлена на множители.

2. *Формулы сокращенного умножения.* Иногда многочлен можно разложить на множители используя формулы сокращенного умножения.

3. *Способ группировки.* Этот способ применяется чаще всего в сочетании со способом вынесения общего множителя за скобки. Суть его состоит в перегруппировке слагаемых в многочлене и дальнейшего объединения в группы таким образом, чтобы после вынесения общего множителя из каждого слагаемого в данной группе в скобке получилось выражение, являющиеся в свою очередь общим множителем для каждой группы.

4. *Метод выделения полного квадрата.* Иногда многочлен можно разложить на множители, если воспользоваться сначала методом полного квадрата, а затем, как правило, формулой разности квадратов.

Данные способы хорошо знакомы учащимся из курса математики, поэтому подробно остановимся только на вынесении общего множителя за скобку.

Пример 5. Решите неравенство $3 \cdot 2^{x+1} + 2 \cdot 5^{x-2} > 5^x + 2^{x-2}$.

Решение. Преобразуем неравенство: $3 \cdot 2^{x-2+3} - 2^{x-2} + 2 \cdot 5^{x-2} - 5^{x-2+2} > 0$.

Преобразуем, применив свойство степени: $8 \cdot 3 \cdot 2^{x-2} - 2^{x-2} + 2 \cdot 5^{x-2} - 5^{x-2} \cdot 25 > 0$.

Выносим общий множитель за скобку: $2^{x-2} \cdot (24 - 1) + 5^{x-2} \cdot (2 - 25) > 0$; $23 \cdot 2^{x-2} - 23 \cdot 5^{x-2} > 0$.

Выносим общий множитель 23 за скобку: $23 \cdot (2^{x-2} - 5^{x-2}) > 0$.

Домножим неравенство на $\frac{1}{23} > 0$, знак неравенства не меняем: $2^{x-2} > 5^{x-2}$.

Разделим левую и правую части неравенства на 5^{x-2} , всегда больше 0, знак неравенства не меняем: $\frac{2^{x-2}}{5^{x-2}} > 1$.

Пользуясь свойством степени, представим 1 как $1 = \left(\frac{2}{5}\right)^0$:
 $\left(\frac{2}{5}\right)^{x-2} > \left(\frac{2}{5}\right)^0$.

Решаем, как простейшее показательное неравенство. Так как основание у нас $\frac{2}{5}$ меньше 1, то знак неравенства меняем на противоположный: $x - 2 < 0$; $x < 2$.

Ответ $(-\infty; 2)$.

Смысл данного способа в том, чтобы рационально применить тот или иной способ разложения на множители и привести показательное неравенство к простейшему.

Неравенства, левая часть которых имеет вид $A \cdot a^{mx+B} + C \cdot a^{kx} + b^{nx} + C \cdot b^{mx}$, где $k, n \in \mathbb{N}, m = k + n$ решаются при помощи деления обеих частей неравенства на a^{mx} или b^{nx} .

Пример 6. Решите неравенство $9 \cdot 7^x - 49 \cdot 3^x > 0$.

Решение. Преобразуем исходное неравенство: $3^2 \cdot 7^x > 7^2 \cdot 3^x$.

Домножим левую и правую части на $7^2 \cdot 3^x$, получим: $\frac{3^{2 \cdot 7^x}}{7^{2 \cdot 3^x}} > 1$.

Пользуясь свойством степени: $\frac{7^{x-2}}{3^{x-2}} > 1$.

После несложных преобразований получаем: $\left(\frac{7}{3}\right)^{x-2} > \left(\frac{7}{3}\right)^0$;

Приводим неравенство к простейшему, так как $\frac{7}{3} > 1$, получаем: $x > 2$.

Ответ $(2; +\infty)$.

Обобщенный метод интервалов

Пример 7. Решите неравенство $(2^x - 8) \cdot (x - 2) < 0$.

Решение. Для того чтобы решить данное неравенство, необходимо найти нули функции, для этого приравняем оба множителя к нулю $2^x - 8 = 0$, $x - 2 = 0$.

Решив линейное уравнение $x - 2 = 0$, получаем $x = 2$. Чтобы найти нуль множителя $(2^x - 8)$, решим простейшее показательное уравнение $2^x - 8 = 0$, получим $x = 3$.

Решим исходное неравенство методом интервалов:



Искомое решение располагается в промежутке $(2; 3)$.

Ответ: $(2; 3)$.

Заключение

Таким образом, наглядно показано, что при изучении методов решений показательных неравенств, необходимо ответственно отнестись

к пониманию каждого из них. Так как, там, где подойдет один метод, другой будет неуместен.

Важно выработать у обучающихся навык применения нужного метода при решении показательных неравенств. Изученная проблема является весьма актуальной, так как с каждым годом задания с показательными неравенствами становятся все сложнее. Изучая в школе все приведенные методы, учащиеся повышают свой уровень знаний в данной области.

Список литературы:

1. Уравнения и неравенства. Нестандартные методы решения. 10-11 классы. Учебно-методическое пособие / С.Н. Олехник, М.К. Потапов, П.И. Пасиченко. М.: Дрофа, 2001. – 219 с. [45-50 с.]

ДЛЯ ЗАМЕТОК

**НАУЧНЫЙ ФОРУМ:
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

*Сборник статей по материалам XXXVII международной
научно-практической конференции*

№ 8 (37)
Сентябрь 2020 г.

В авторской редакции

Подписано в печать 10.09.20. Формат бумаги 60x84/16.
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,375. Тираж 550 экз.

Издательство «МЦНО»
123098, г. Москва, ул. Маршала Василевского, дом 5, корпус 1, к. 74
E-mail: tech@nauchforum.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного
оригинал-макета в типографии «Allprint»
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3



**НАУЧНЫЙ
ФОРУМ**
nauchforum.ru