

КОМПОЗИТНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ НЕФТИ И УЛУЧШЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛЕЖЕЙ

Н.М. Велиев¹, М.А. Курбанов², Н.А. Исмаилов^{3,4}, И.С. Рамазанова²,
М. М. Муталлимов³, Г.Х. Гусейнова², З.А. Дадашев², С.Р. Калантаров⁵

¹Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики, Баку,
Азербайджан

² Институт Физики, Баку, Азербайджан

³ Институт Прикладной Математики, Бакинский Государственный
Университет, Баку, Азербайджан

⁴ Институт Информационных Технологий, Баку, Азербайджан

⁵ Военно-воздушные силы МО Азербайджана, Баку, Азербайджан
e-mail: inao212@rambler.ru

Резюме. Разработаны новые пьезоэлектрические преобразователи на основе полимеров, диспергированных сегнетопьезоэлектрическими частицами для проведения разведки нефти и улучшения степени фильтрации скважин. Установлено, что композиты на основе фторсодержащих полимеров обладают высокими пьезоэлектрическими и физико-механическими характеристиками.

Ключевые слова: пьезокерамики, полимер, композит, пьезоэлектрик, ультразвуковой генератор,

AMS Subject Classification: 537226.

1. Введение

В настоящее время для сейсмической разведки нефти, а также для повышения добычи нефти при эксплуатации скважин в море и на суше используются различные электромеханические преобразователи на основе пьезокерамики. Однако они обладают рядом существенных недостатков, таких как сложность конструкции и технологии изготовления, большой вес и небольшой срок службы. В последнее десятилетие проводятся широкие исследования пьезоэлектрических свойств полимеров, которые по сравнению с пьезокерамическими материалами обладают хорошими физико-механическими свойствами, легко поддаются переработке (особенно термопластические материалы) экструзией, прокаткой и прессованием. Это позволяет изготавливать из них протяженные электромеханические преобразователи в виде лент, пленок, сферы, трубок и листов. Среди полимеров наилучшими пьезоэлектрическими свойствами [5,11] обладает поливинилиденфторид (ПВДФ) и поэтому большинство исследований сконцентрированы на нем и его сополимерах. ПВДФ при охлаждении от 150°C кристаллизуется в α -форме, которая после ориентационной вытяжки

при температурах 40-80°C в 1-7 раз переходит в полярную β -форму. В этой форме ПВДФ после поляризации в электрическом поле приобретает пьезоэлектрические свойства, которые характеризуются пьезоэлектрическими коэффициентами $d_{31} = 13$ пКл/Н, $d_{33} = 9$ пКл/Н [6,7]. Пьезоэлектрические свойства ПВДФ сильно зависят от содержания кристаллитов β -фазы в полимере, степени кристалличности и условий поляризации. Поэтому в протяженных элементах из ПВДФ трудно добиться однородности пьезоэлектрических свойств по всей площади преобразователя. Кроме того, пьезокоэффициенты ПВДФ не высоки по сравнению с керамическими материалами. Одним из способов повышения пьезокоэффициентов полимерных материалов является введение в них пьезоэлектрических наполнителей. Такие полимерные композиты обладают достаточно хорошими физико-механическими свойствами, поддаются переработке теми же способами, что и полимеры, высокими по сравнению с полимерами пьезокоэффициентами, стабильностью геометрических размеров однородностью свойств и относительной дешевизной.

Представляет также интерес применение других физических эффектов в полимерах и полимерных композитах для преобразования акустических сигналов в электрические. Одним из таких эффектов является электретный эффект, который широко исследуется в полимерных материалах. Электреты из полимерных материалов обладают высокой поверхностной плотностью зарядов и стабильностью заряда и позволяют с высокой эффективностью и чувствительностью преобразовывать акустические сигналы в электрические. Наиболее широко используются в настоящее время электреты из политетрафторэтилена и полиэтилентерефталата. Однако эти полимеры плохо поддаются переработке, особенно ПТФЭ. Кроме того, электреты из этих полимеров имеют неоднородное распределение заряда по поверхности и нестабильны при повышенной влажности. Поэтому представляет интерес получение электретов и пьезоэлектриков из материалов лишенных этих недостатков. Эту задачу позволяют решить полимерные композиты с различными низкомолекулярными наполнителями, которые создают в полимерной матрице равномерно распределенные глубокие ловушки и повышают диэлектрическую проницаемость материала, что позволяет получать из таких композитов эффективные электреты и пьезоэлектрики с большой равномерно распределенной по поверхности плотностью заряда и высокой стабильностью заряда при повышенных температурах и во влажных средах. Такими наполнителями могут служить различные окислы и сегнетокерамические материалы.

Таким образом, использование полимерных композитов позволяет получать эффективные электроакустические преобразователи любой формы в виде лент, листов, трубок, кабелей, сферы, в которых используются для

преобразования пьезоэлектрический, электретный эффекты. Ультразвуковая обработка нефтяных пластов позволяет увеличивать нефтедобычу ранее использованных скважин. Главным элементом этого оборудования (каротаж) является пьезоэлектрический керамический преобразователь. Предложенное оборудование состоит следующих функциональных блоков:

- электронный ультразвуковой генератор;
- стандартный геофизический кабель типа НКВЗ-36;
- пьезокерамический излучатель скважин.

С точки зрения разработки более эффективных генераторов акустических волн на основе пьезокерамики, ограниченной в основном тем, что пьезокерамический преобразователь является хрупким и пористым. Пористость керамических преобразователей в основном влияет на их электрофизические и пьезоэлектрические свойства. Проявляется нестабильность резонансной частоты и величины объемного и поверхностного сопротивлений. Основные характеристики ультразвуковых оборудований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики.

| | |
|---|---------|
| Мощность использования, кВт | 3,0 |
| Регулируемая выходная мощность генератора, кВт | 2,5 |
| Выходная мощность излучателя, кВт | 1,0 |
| КПД излучателя, % | 85 |
| Амплитудный диапазон выходного напряжения генератора, В | 60-1000 |
| Рабочий частотный диапазон, кГц | 18-30 |
| Длина геофизического кабеля | 2-5 |
| Гидростатическое давление, мПа | 50 |
| Температура скважины, °С | 140 |
| Габаритные размеры излучателя, мм | 120*44 |
| Вес генератора, кг | 10 |
| Вес излучателя, кг | 5 |

Первичные экспериментальные результаты показывают, что переход пьезокерамического излучателя на пьезокомпозитные может, сопровождается уменьшением веса, пористости, механической и электрической прочностей. Поэтому учитывая механические и теплофизические характеристики полимерной матрицы можно целенаправленно варьировать основные силовые характеристики полимерных преобразователей.

Кроме вышеуказанных областей применения акустических преобразователей большое значение имеет использование их в качестве мощных пьезоэлектрических элементов сферической формы для повышения производительности эксплуатируемых пластов. При этом необходимо увеличивать следующие макроэкономические параметры: пьезоэлектрический

модуль d_{ij} , плотность пьезоэлемента ρ , коэффициент электромеханической связи K_{ij} , добротность Q_M , большая выходная энергия при электрическом резонансе f_M . Эти параметры можно определить с помощью методов идентификации из [1-3,9,10]. Исследование композитных пьезоэлектрических материалов показывает, что применение их в акустике требует получения на их основе пьезоэлектрических элементов любой конфигурации и размеров. Решение нашей задачи требует получения пьезоэлементов для разработки преобразователей с большой выходной мощностью в фокусе.

Целью данной статьи является разработка композитных пьезоэлектрических преобразователей с большой выходной мощностью и применение их для увеличения производительности добычи нефти эксплуатируемых скважин.

Для исследования пьезоэлектрических свойств композитов были выбраны различные полимеры: полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), поливинилиденфторид (ПВДФ), поливинилфторид (Ф1) и сополимер винилиденфторида с тетрафторэтиленом (Ф42). Эти полимеры отличаются друг от друга своими физическими свойствами. ПЭ и ПП – неполярные полимеры с низким значением диэлектрической проницаемости, а фторсодержащие полимеры ПВДФ, Ф1 и Ф42 – полярные полимеры с высоким значением диэлектрической проницаемости. Кроме того сами фторсодержащие полимеры обладают пьезоэлектрическими свойствами. Среди них как уже указывалось, выделяется ПВДФ [6,11]. В качестве наполнителя также использовались сегнетоэлектрические порошки с различными значениями диэлектрической проницаемости и пьезокоэффициентов. Использовались порошки керамик ЦТС-21, титаната бария (ТБ), ПКР-1, ПКР-3М и ПКР-7М (пьезокерамики Ростовские).

На рис. 1 приведена зависимость пьезокоэффициента d_{33} композита на основе ПЭ и ПВДФ с ЦТС-21 от объемного содержания пьезонаполнителя Ф. Там же приведена зависимость d_{33} для композита ПВДФ-ЦТС, рассчитанная по формуле

$$d_{33} = \frac{15\Phi}{(2 + 3\Phi)(1 - \Phi)} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} d_2$$

Видно, что d_{33} композитов также нелинейно растут с содержанием наполнителя и значительно превосходят значения d_{33} , рассчитанные по вышеуказанной формуле [6,7].

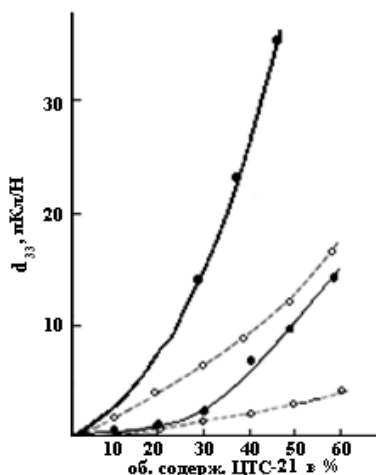


Рис. 1. Зависимость d_{33} композитов ПЭ-ЦТС-21(1:1) и ПВДФ-ЦТС -21 (2:2) от содержания наполнителя. Пунктиром показаны зависимости, полученные по формуле.

На рис. 2 показана зависимость d_{33} композита ПВДФ-ЦТС, ПВДФ-ПКР-3М, ПЭ-ПКР-3М и ПЭ-ЦТС от напряженности поля поляризации E_D . Во всех случаях d_{33} композита сначала возрастает, достигает максимального значения при некотором E_D , а затем начинает уменьшаться.

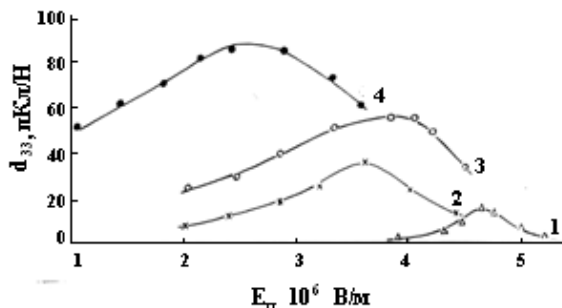


Рис. 2. Зависимость d_{33} композитов от напряженности поля поляризации. 1 – композит ПЭ-ЦТС-21; 2 – ПВДФ-ЦТС-21; 3 – ПЭ-ПКР-3М; 4 – ПВДФ-ПКР-3М.

Такая же зависимость d_{33} с максимумом наблюдается и от температуры поляризации T_D , как показано на рисунке 3 для ряда композитов. Таким образом, существуют оптимальные условия поляризации, при которых d_{33} данного композита достигает наибольшего значения. Возможно, оптимальная температура поляризации зависит в основном от

вида полимера, а оптимальная напряженность поля поляризации зависит от соотношения диэлектрических проницаемостей полимера и наполнителя.

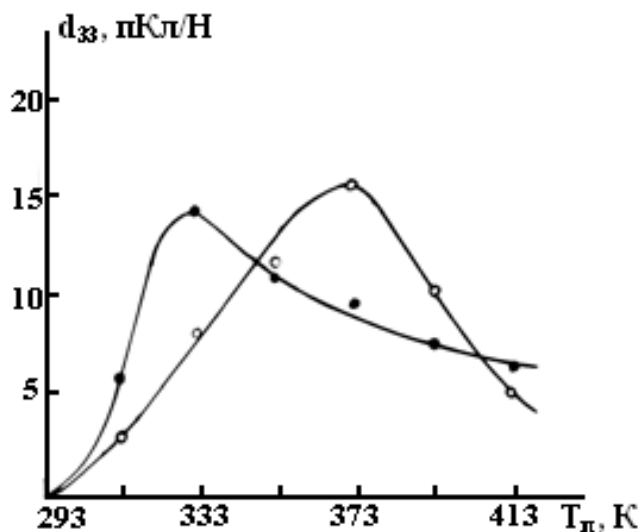


Рис. 3. Зависимость d_{33} композитов от температуры поляризации. 1- ПЭ-ЦТС-21; 2-ПВДФ-ЦТС-21.

В таблице 2 приведены значения оптимальных E_D и T_D для ряда испытанных композитов.

Таблица 2. Оптимальные условия поляризации композитов.

| Композит | ПЭ-ЦТС-21 | ПВДФ-ЦТС-21 | ПВДФ-ПКР-3М | ПП-ПКР-3М |
|-------------------------|-----------|-------------|-------------|-----------|
| $T_p, ^\circ\text{C}$ | 60 | 100 | 120 | 120 |
| $E_p, 10^6 \text{ В/м}$ | 5,2 | 3,5 | 4,0 | 4,8 |

На рис. 4 показана зависимость пьезокоэффициента g_{33} ряда композитов от содержания наполнителя в них. Анализ приведенных результатов показывает, что для получения композита с большим значением пьезокоэффициента d_{33} необходимо выбрать пьезокерамику с возможно меньшей величиной диэлектрической проницаемости и с возможно большей величиной d_{33} , в тоже время необходимо выбрать полярный полимер с возможно большим значением ϵ .

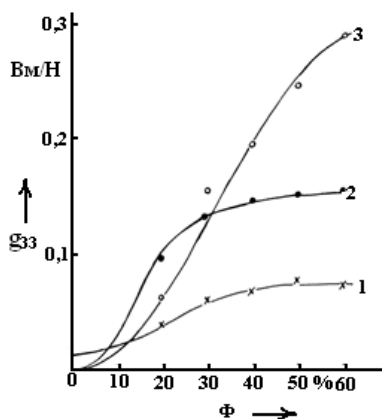


Рис. 4. Зависимость пьезокоэффициента g_{33} композитов от содержания наполнителя. 1 – ПЭ-ЦТС-21; 2- ПЭ-ПКР-7М; 3 – ПЭ-ПКР-3М.

Кроме того, по-видимому, d_{33} композита зависит также от свойств граничного слоя полимер – керамика, от соотношения жесткости полимера и керамики и других факторов.

Для композитов на основе фторсодержащих полимеров пьезокоэффициент d_{33} можно увеличить, изменив режим прессования. На рис. 5 приведена зависимость d_{33} композита ПВДФ-ЦТС-21 от времени прессования. В этом случае образцы выдерживались под давлением при температуре прессования в течение определенного времени, а затем охлаждались в воде. Видно, что d_{33} композита с увеличением времени прессования возрастает почти в два раза и достигает насыщения примерно через 1 ч.

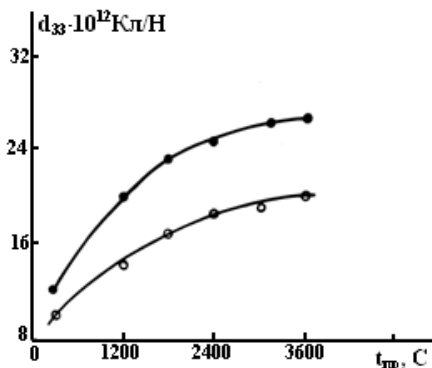


Рис. 5. Зависимость d_{33} композитов ПВДФ-ЦТС-21 от времени прессования. 1- содержание ЦТС-21 40% об.; 2 – содержание ЦТС-21 50% об.

Можно сделать предположение, что увеличение времени прессования в случае ПВДФ приводит к структурированию полимера и увеличению в нем содержания пьезоэлектрической кристаллической фазы и это приводит к увеличению пьезокоэффициента и диэлектрической проницаемости самого полимера и в целом всего композита. Таким образом, можно сделать вывод о том, что вариацией технологических режимов получения композитов, температурно-временного, температурно-барийного режимов кристаллизации, структуры полимерной матрицы и пьезоэлектрической фазы, объемного содержания и температуры можно оптимизировать [4,8,9] величины электромеханических, пьезоэлектрических и физико-механических характеристик композитов. Для развития вышеуказанных целей необходимо предложить модель, описывающая физический механизм формирования пьезоэлектрического эффекта и путей оптимизации характеристик [4,8] пьезоэлектрических материалов для преобразователей, применяемых в нефтяной промышленности.

Литература

1. Aliev F.A., İsmailov N.A. Inverse problem to determine the hydraulic resistance coefficient in the gas-lift process, *Appl. Comput. Math.*, Vol.12, No.3, 2013, pp.306–313.
2. Aliev F.A., İsmailov N.A., Gasimov Y. S., Namazov A.A., Rajabov M.F., A method to solving some identification problem. *Book of Abstracts, The 5-th Int. Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, 27 – 29 August, 2015*, pp.237-239
3. Aliev F.A., İsmailov N.A., Namazov A.A., Asymptotic method for finding the coefficient of resistance in littiny of fluid on tubing. *Journal of Inverse and Ill – Posed Problems*, Vol.23, No.5, 2015, pp.511–518.
4. Aliev F.A., Larin V.B., *Optimization of linear Control Systems. Analytical Methods and Computational Algorithms*, Gordon and Breach, 1998, 272 p.
5. Kurbanov M.A., Shakhtakhtinsky M.G., Musaeva S.N., *Physics of composite active materials*, AR–nin prezidenti H. Əliyevin 80 illik yubileyinə həsr olunmuş elmi konfransın materialları. Bakı, 2003, s. 155–167.
6. Wede H., Fukada E., Karasg E. Frank. Piezoelectricity in three phase systems. *Journal of Applied Physics*, 1986, Vol.60, No.8, pp.2672-2677.
7. Yuguo W.et al. Pyroelectric properties of ferroelectric-polymer composites. *Journal of Applied Physics*, 1993, Vol.74, No.1, pp.521-524.
8. Алиев Ф.А., *Методы решения прикладных задач оптимизации динамических систем*. Элм, Баку, 1989.
9. Алиев Ф.А., Гасанов К.К., Гулиев А.П., *Метод прогонки для решение системы гиперболических уравнений описывающих движение при добыче нефти* *Proceedings of IAM*, Vol.3, No.2, 2014, pp.249-255.

10. Алиев Ф.А., Исмаилов Н.А., Гидравлического сопротивления в газлифтном процессе, Proceedings of IAM, Vol.2, No.1, 2013, pp.3-10.
11. Керимов М. К., Курбанов М. А., Алиев Г. Г., Иззатов Б.М., Керимов Э.А., Электретный эффект в фторуглеродистых полимерах, электротермополяризованных в механическом поле, Доклады НАН Азерб., 2004, с.60–67.

Kompozit pyezoelektrik çeviricilər vasitəsilə neft yataqlarının kəşfiyyatı və süzülmə xüsusiyyətlərinin akustik dalğalarla öyrənilməsi

**N.M. Vəliyev, M.A. Qurbanov, N.A. İsmayılov, İ.S. Ramazanova,
M.M. Mütəllibov., G.X. Hüseynova, Z.A. Dadaşov, S.R. Kələntərov**

XÜLASƏ

Yeni polimer əsaslı pyezoelektrik çeviricilər alınmışdır ki, bunun əsasında karbohidrat yataqlarının seçnetopyezoelektrik hissəciklərin vasitəsi ilə kəşfiyyatı və layda süzülmənin səmərəliliyinin artırılması öyrənilir. Təyin olunur ki, polimer əsaslı kompozitlər daha yüksək kimyəvi və mexaniki xassələrə (xüsusiyyətlərə) malikdir.

Açar sözlər: pyezokeramik, polimer, kompozit, pyezoelektrik, ultrasəs generator.

Composite piezoelectric transducers for acoustic oil exploration and improvement filtration properties of reservoirs

**N.M. Veliev, M.A. Kurbanov, N.A. Ismailov, İ.S. Ramazanova,
M.M. Mutallimov, G.Kh. Guseynova, Z.A. Dadashov, S.R. Kalantarov**

ABSTRACT

Developed of piezoelectric transducers based on polymers dispersed particles ferroelectric for oil exploration wells and improve the degree of filtration. It is found that composites based on fluorine-containing polymers possess high piezoelectric and physic-mechanical properties.

Keywords: piezoceramic, polymer, composites, piezoelectric, ultrasonic generator.