

**Г.С. Митюрин¹, В.В. Кожушко², В.Н. Мышковец¹,
Д.Г. Митюрин³, И.А. Яшин³**

¹УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь,

²ГНУ «Институт механики металлополимерных систем
имени В.А. Белого», Гомель, Беларусь,

³РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»
БелНИПИнефть, Гомель, Беларусь

ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ГАУССОВЫМИ И БЕССЕЛЕВЫМИ СВЕТОВЫМИ ПУЧКАМИ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД (КЕРНАХ)

Введение

Проблемы исследования образцов минералов из глубоких геологических отложений – одно из востребованных современных направлений при решении многих задач по разведке и добыче трудноизвлекаемых запасов нефти и газа. Как утверждается в [1], анализ керна производится для оценки пористости, проницаемости, флюидонасыщенности, плотности минерального скелета (зерен), литологического состава и структуры породы. Однако существующие методы изучения емкостных и прочностных свойств геоматериалов достаточно трудоемки и связаны со значительными временными затратами, а такие как компьютерная рентгеновская томография, ЯМР-спектроскопия, трековая радиография, программа «цифровой керн» – с существенными финансовыми затратами. Поэтому развитие других, более оперативных и менее затратных методов, конкурентоспособных по сравнению с традиционными методами изучения микроструктуры горных пород, их упругих и фильтрационно-емкостных свойств, представляется перспективным.

Воздействие лазерного импульсного излучения на поглощающие среды может приводить к возбуждению акустических поверхностных, продольных и поперечных волн [2]. Эффективность фототермоакустического (ФТА) преобразования определяется, как известно [2], оптическими, диссипативными, теплофизическими, упругими, линейными и нелинейными свойствами исследуемых образцов, а также поляризационными и энергетическими параметрами лазерного излучения [3].

В последние несколько десятилетий импульсная оптико-акустическая диагностика интенсивно развивается и успешно применяется для исследования металлических композитов [4, 5], композиционных материалов [6], графито-эпоксидных композитов [7], нанокompозитных структур [8], хиральных метаматериалов и кластеров наноспиралей [9], а также геоматериалов [10].

1. Схема эксперимента

Цель данной работы – исследование возможности лазерного импульсного возбуждения упругих волн, определение скорости распространения продольных и сдвиговых мод в керновых материалах, облучаемых гауссовыми и бесселевыми световыми пучками, а также расчет (в рамках двухфазной модели среды) емкостных и прочностных параметров образцов горных пород (кернов) на основании результатов экспериментального измерения амплитуды ФТА сигналов.

В данной работе в целях импульсного возбуждения ультразвука использовалось излучение YAG:Nd³⁺ лазера модели LS-2134У, генерирующего в режиме модулируемой добротности на длине волны 1064 нм и на частоте второй гармоники (532 нм) – с энергией в импульсе порядка 15÷20 мДж при длительности импульсов около 10 нс и частоте следования импульсов 10÷12 Гц. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

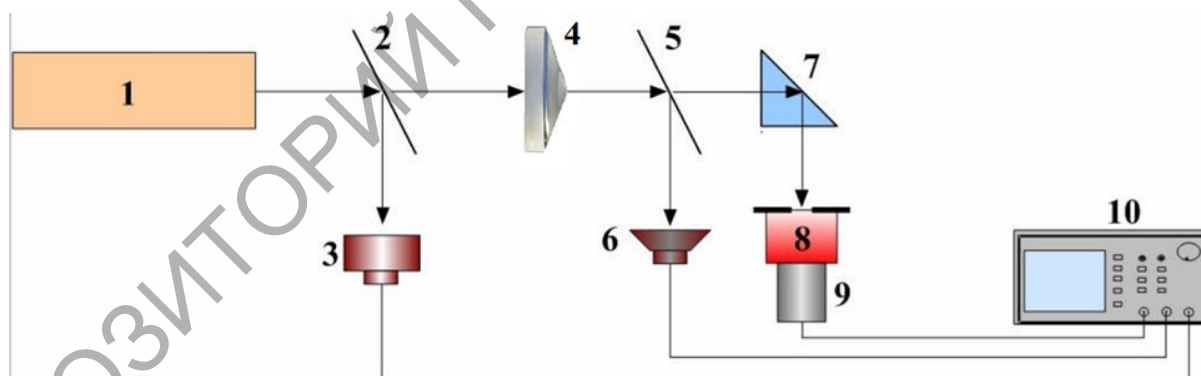


Рисунок 1 – Схема лазерной импульсной фотоакустической спектроскопии: 1 – лазер; 2 – делительная пластина; 3 – фотодиод; 4 – аксион; 5 – делительная пластина; 6 – измеритель плотности лазерной энергии; 7 – стеклянная поворотная призма; 8 – исследуемый образец керна; 9 – пьезоэлектрический преобразователь; 10 – цифровой осциллограф

Регистрация возбуждаемых акустических импульсов осуществлялась пьезопреобразователем на основе поляризованной керамики

ЦТС-5, толщиной 0,2 мм, который работал без усилителя с максимальной частотой 15 МГц. В указанных целях использовался также широкополосный пьезоприемник на основе ПВДФ-пленки толщиной 25 мкм с предварительным усилителем, работающим в режиме «холодного хода», ограничивающим рабочую полосу частот сверхчастотой 15 МГц. Сигнал с пьезопреобразователя регистрировался цифровым двухканальным осциллографом типа TektronixTDS220 с аналоговой полосой 60 МГц при частоте дискретизации 1 ГГц. Для регистрации времени воздействия лазерного импульса на поверхность кернового цилиндрического образца использовался фотодиод Hamamatsu S5971-1. Формирование бесселевых световых пучков осуществлялось с использованием конической линзы с углом конусности $\alpha = 1^\circ$; линза устанавливалась между выходным окном лазерной системы и поворотным зеркалом, на поверхность которого был напылен тонкий слой золота. Керновые образцы различных горных пород (известняк, доломит, алевролит, глина, мергель, песчаник) цилиндрической формы, толщиной от 8 до 16 мм с указанием основных физико-технических параметров были предоставлены Центром исследования, обработки и хранения керна РУП «ПО «Белоруснефть».

2. Модель, результаты исследований и обсуждение

Результаты экспериментального измерения профилей акустических импульсов при возбуждении звука гауссовыми и бесселевыми световыми пучками представлены на рисунках 2–5.

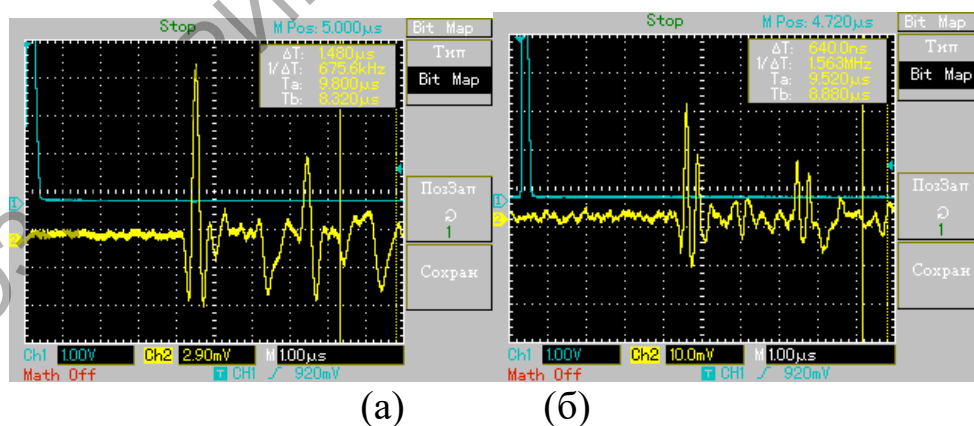
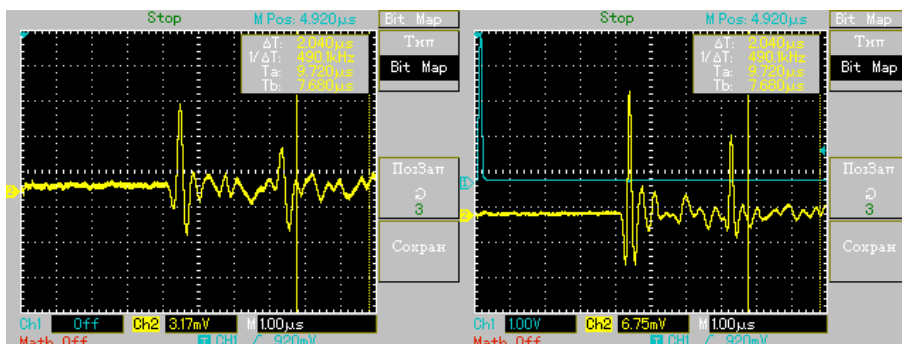


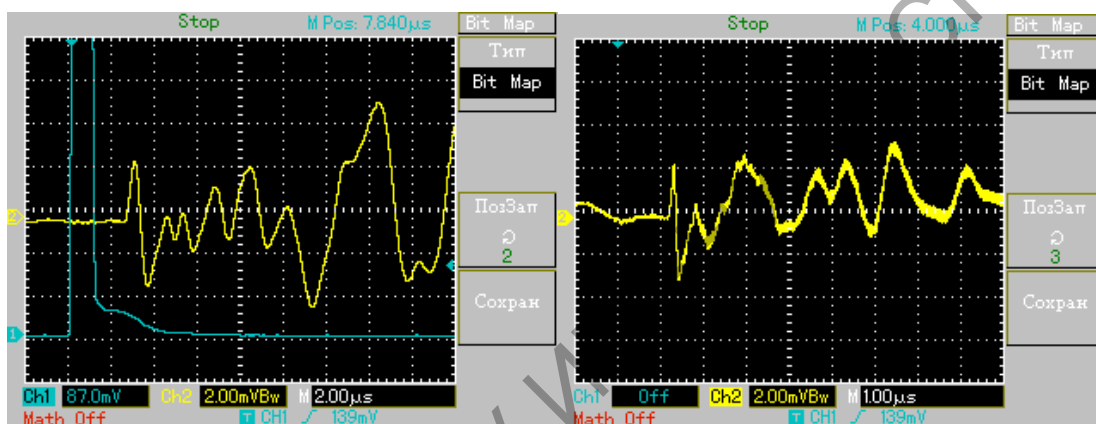
Рисунок 2 – Профиль акустического импульса, индуцированного в керне гауссовым световым пучком
(а) доломит, (б) известняк



(а) (б)

Рисунок 3 – Профиль акустического импульса, индуцированного в керне бesselевым световым пучком

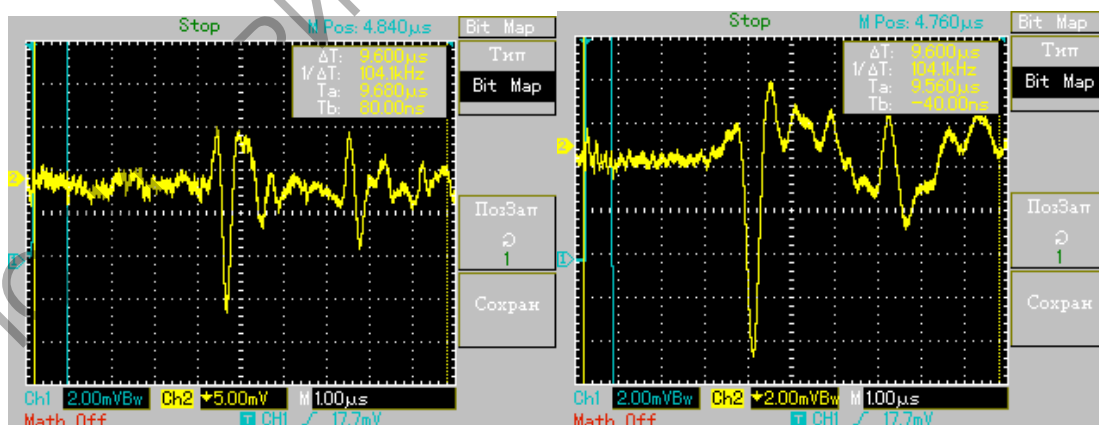
(а) доломит, (б) известняк



(а) (б)

Рисунок 4 – Профиль акустического импульса, индуцированного в керне гауссовым световым пучком

(а) глина, (б) известняк слабоглинистый



(а) (б)

Рисунок 5 – Профиль акустического импульса, индуцированного в керне бesselевым световым пучком

(а) глина, (б) известняк слабоглинистый

Временная развертка продольных ультразвуковых импульсов (рисунок 2) соответствует типичным спектрам [1], возбуждаемым лазерными пучками с гауссовым распределением интенсивности. В случае использования бесселевых световых пучков возбуждаются как продольная, так и поперечная акустическая мода (рисунок 3), что обусловлено особенностью механизма ФТА преобразования импульсов с бесселевым распределением энергии. После нахождения (по графикам) значений скоростей продольных и сдвиговых волн можно определить полный набор упругих параметров исследуемых кернов (модуль сдвига, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль объемной упругости (коэффициент всестороннего сжатия)), которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения прочностных параметров керновых образцов

Номер образца	Горизонт	Литология	Модуль сдвига, Па 10 ⁹	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, Па 10 ⁹	Модуль объемной упругости, Па 10 ⁹
5768	D ₃ ln	Песчаник	7,96	0,29	20,54	16,3
5712	D ₃ ln	Глина	12,34	0,29	31,83	25,25
1358	D ₃ zd(ton)	Доломит	19,28	0,30	49,75	39,47
8465	D ₃ sr	Известняк	23,71	0,30	61,18	48,53
6016	D ₃ vr(pch)	Известняк слабоглинистый	19,98	0,29	48,98	38,85
3493	D ₃ lb	Известняк слабоглинистый	22,08	0,30	57,6	48,3
3814	D ₃ ln	Глина	5,379	0,30	14	1,19

При определении пористости керновых образцов воспользуемся, аналогично [11], моделью двухфазной среды – «пористый образец – метанол». Скорость звуковой волны в пористом образце можно выразить из формулы

$$V_{н.обр.}^2 = \frac{1}{(\rho_{н.обр.} (m / \rho_{кern} V_{кern}^2 + (1 - m) / \rho_{эт} V_{эт}^2))}, \quad (1)$$

где $V_{н.обр.}$ определяется соотношением

$$V_{н.обр.} = \frac{hV_{кern}}{h + V_{кern} \Delta t}, \quad (2)$$

Δt – время задержки акустического импульса относительно опорного сигнала;

$$\rho_{н.обр.} = m\rho_{керна} + (1 - m)\rho_{эт}, \quad (3)$$

$\rho_{н.обр.}$ – плотность двухфазной среды «образец керна – этанол».

Объединяя (1) – (3) получим квадратное уравнение относительно m , корни которого

$$m = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha \cdot \gamma}}{2\alpha}, \quad (4)$$

где α , β и γ соответственно вычисляются по формулам:

$$\alpha = \frac{1}{V_{керна}^2} + \frac{1}{V_{эт}^2} - \frac{\rho_{керна}}{\rho_{эт}V_{эт}^2} - \frac{\rho_{эт}}{\rho_{керна}V_{керна}^2}, \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\rho_{керна}}{\rho_{эт}V_{эт}^2} + \frac{\rho_{эт}}{\rho_{керна}V_{керна}^2} - \frac{1}{V_{эт}^2}, \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{1}{V_{эт}^2} - \frac{1}{V_{н.обр}^2}. \quad (7)$$

После нахождения параметров, определенных в формулах (1) – (7) несложно определить пористость материала исследуемых образцов, вырезанных из керна. Вычисление значений m реализовано с использованием пакета программ ПО Mathcad 15; полученные при этом результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты определения пористости керновых образцов

Номер образца	Горизонт	Литология	Коэффициент открытой пористости, %, определенный методом	
			гидростатического взвешивания	лазерной фотоакустики
5768	D ₃ ln	Песчаник	–	14,476
5712	D ₃ ln	Глина	–	8,664
1358	D ₃ zd(ton)	Доломит	6,4	5,285
8465	D ₃ sr	Известняк	4,6	4,282
6016	D ₃ vr(pch)	Известняк слабоглинистый	4,11	5,429
3493	D ₃ lb	Известняк слабоглинистый	1,78	1,013
3814	D ₃ ln	Глина	7,38	6,023

Заключение. Таким образом, в данной работе представлены результаты экспериментального измерения скоростей продольных и поперечных звуковых волн, возбуждаемых в образцах горных пород (кернах) лазерными импульсами с гауссовым и бесселевым пространственным распределением интенсивности. В рамках модели двухфазной среды продемонстрирована возможность определения пористости исследуемых образцов керна с погрешностью не более 5%, а также вычислены все упругие модули образцов, необходимые для характеристики их прочностных свойств.

Литература

1.Андерсон, М.А. Анализ керна: Истина в последней инстанции при оценке характеристик пласта / М.А. Андерсон, Б. Дункан, Р. МакЛин // Нефтегазовое обозрение. –Schlumberger. –2013-2014. – Сб. II. –С. 4–17.

2.Гусев, В.Э. Лазерная оптоакустика / В.Э. Гусев, А.А. Карабутов.– М.: Наука, 1994. –304 с.

3.Пятницкий Л.Н. Волновые бесселевые пучки / Л.Н. Пятницкий. – М.: Физматлит. –2012. –406 с

4.Кожушко, В.В. Определение модулей металлических композитов бесконтактной регистрацией оптико-акустических импульсов / В.В. Кожушко, В.П. Сергеев, В.Н. Мышкова // Ученые записки физического факультета МГУ. –2017. – № 5. – С. 1251001-1–1251001-4.

5.Карабутов, А.А. Влияние пористости на дисперсию фазовой скорости продольных акустических волн в изотропных металломатричных композитах / А.А. Карабутов, Н.Б. Подымова // Акустический журнал. –2017. –Т. 63, № 3. –С. 265–274.

6.Калашников, И.Е. Применение оптико-акустического метода для определения упругих модулей металломатричных композиционных материалов, модифицированных тугоплавкими наночастицами / И.Е. Калашников, Л.К. Болотова, Л.И. Кобелева, Н.Б. Подымова, А.А. Карабутов // Ученые записки ЗабГУ. – 2014. – № 3(56). – С. 52–60.

7.Карабутов, А.А. Распространение продольных и сдвиговых акустических видеоимпульсов в графито-эпоксидных композитах / А.А. Карабутов, И.М. Керштейн, И.М. Пеливанов, Н.Б. Подымова // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45, № 1. – С. 86–91.

8. Andrusenko, D. Photoacoustic effect in nanocomposite structure porous silicon–liquid / D. Andrusenko, M. Isaev, A. Kuzmich, V. Lysenko, R. Burbello // *Nanoscale Research Letters*. – 2012. – Vol. 7. – P. 411–416.

9. Beneditti, A. Precise detection of circular dichroism in a cluster of nano-helical by photoacoustic measurements / A. Beneditti, B. Alam, M. Esposito, V. Tasco, G. Leahu, A. Belardini, R. LiVoti, A. Passaseo, C. Sibia // *Scientific reports*. – 2017. |7:5257| DOI: 10.1038/s41598-017-05193-4.

10. Карабутов, А.А. Лазерная ультразвуковая спектроскопия / А.А. Карабутов, В.А. Макаров, Е.Б. Черепецкая, В.А. Шкуратник. – М.: Горная книга, 2008. – 175 с.

11. Жаркий, С.М. Исследование слоев пористого кремния лазерным ультразвуковым методом / С.М. Жаркий [и др.] // *ФТП*. – 2003. – Т. 37. – Вып. 4. – С. 485–489.

Е.В. Тимощенко¹, Ю.В. Юревич²

¹УО «Могилёвский государственный университет имени А.А. Кулешова», Могилёв, Беларусь,

²УО «Могилёвский государственный университет продовольствия», Могилёв, Беларусь

РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИСТАБИЛЬНОГО ТОНКОПЛЁНОЧНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Введение

В настоящее время широко востребованными в фотонике и оптоэлектронике являются устройства управления светом. Наибольший интерес проявляется к тем из них, у которых основные функциональные элементы представляют планарные структуры тонких плёнок, изготовленных на основе активных сред с нелинейностью в области оптического резонанса. Внедрение в структуру оптического устройства резонансных слоёв с высокой плотностью активных центров может обусловить изменение реакции всей системы на излучение, не нарушая при этом компактности [1]. Полупроводниковые наноструктуры, которые активно исследуются в настоящее время, обладают необходимыми свойствами плотных резонансных сред [2]. В этих объектах нелинейный отклик на когерентное излучение особо выражен в спектральной области, соответствующей экситонным перехо-