



УДК 622.276

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ОПТОАКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ НА НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ



### MATHEMATICAL MODEL OF THE IMPACT OF A PULSED OPTOACOUSTIC WAVE ON AN OIL RESERVOIR

**Зейналов Анар Наиб оглы**

кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
НИИ «Геотехнологические Проблемы  
Нефти, Газа и Химия»,  
Азербайджан  
anar.zeynalov13@hotmail.com

**Гасанов Хикмет Гафар оглы**

руководитель отдела,  
Национальное аэрокосмическое  
агентство Азербайджана,  
Азербайджан  
h.h.hassanov@yahoo.com

**Аннотация.** В статье рассматривается оптоакустическая импульсная волна, которая возникает при взаимодействии импульсного лазерного излучения с жидкостью. Преимущество этой волны состоит в том, акустическое давление при этом доходит до 108–109 Па, и параметры излучения управляемы. Такое большое давление возникает за счет большой мощности импульсного лазерного излучения и малым временем длительности импульса, которые недоступны другими методами. В основу математической модели, описывающей возникновение и распространение импульсной оптоакустической волны в неоднородной жидкости, были положены законы сохранения импульса и энергии. При этом необходимо учесть, что с глубиной скважины все теплофизические и акустические свойства среды изменяются, т.е. являются функциями координат.

**Ключевые слова:** нефтеотдач пластов, оптоакустическая импульсная волна, акустическое давление, нефть, скважина, призабойная зона пласта.

**Zeynalov Anar Naib oglu**

Candidate of Technical Sciences,  
Leading Scientific Researcher,  
Research Institute  
«Geotechnological Problems  
of Oil, Gas and Chemistry»,  
Azerbaijan  
anar.zeynalov13@hotmail.com

**Hasanov Hikmet Gafar oglu**

Head of Department,  
National Aerospace Agency of Azerbaijan,  
Azerbaijan  
h.h.hassanov@yahoo.com

**Annotation.** The article considers an optoacoustic pulsed wave that occurs when pulsed laser radiation interacts with a liquid. The advantage of this wave is that the acoustic pressure reaches 108–109 Pa, and the radiation parameters are controllable. Such a large pressure arises due to the high power of the pulsed laser radiation and the short pulse duration, which are not available by other methods. The mathematical model describing the appearance and propagation of a pulsed optoacoustic wave in an inhomogeneous fluid was based on the laws of conservation of momentum and energy. It is necessary to take into account that with the depth of the well, all the thermophysical and acoustic properties of the medium change, i.e., they are functions of coordinates.

**Keywords:** oil recovery, optoacoustic pulsed wave, acoustic pressure, oil, well, bottomhole formation zone.

Исследованию увеличения нефтеотдачи пластов под действием внешних физических полей посвящено огромное количество работ [1, 2]. Следует отметить, что существующие методы увеличения нефтеотдачи пластов малоэффективны, энергоемки, трудоемки и экологически небезопасны. Эффективность применения комбинированного метода воздействия на призабойную зону пласта можно существенно повысить за счет правильного выбора физической и математической моделей, описывающих само воздействие. Акустическая волна, используемая для этих целей, должна удовлетворять следующим условиям: 1) она должна быть импульсной, 2) частота и интенсивность должны быть управляемы и 3) эта волна должна распространяться до забоя скважины с минимальной потерей энергии. Акустические волны, распространяясь в скважине, просачиваются в призабойную зону, очищают ее от твердых частиц, загрязняющих коллектор, в результате чего обеспечивается интенсификация фильтрационных свойств пород. По нашему мнению, оптоакустическая импульсная волна является наиболее эффективным средством для очищения забоя скважины и призабойной зоны пласта от загрязнения твердыми частицами.

Оптоакустическая импульсная волна – это акустическая волна, которая возникает при взаимодействии импульсного лазерного излучения с жидкостью. Преимущество этой волны состоит в том, акустическое давление при этом доходит до 108–109 Па, и параметры излучения управляемы. Такое большое давление возникает за счет большой мощности импульсного лазерного излучения и малым



временем длительности импульса, которые недоступны другими методами. В основу математической модели, описывающей возникновение и распространение импульсной оптоакустической волны в неоднородной жидкости, были положены законы сохранения импульса и энергии. При этом необходимо учесть, что с глубиной скважины все теплофизические и акустические свойства среды изменяются, т.е. являются функциями координат.

Для одномерного случая это уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c^2(x) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho(z)} \left( \xi(z) + \frac{4}{3} \eta(z) \right) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t \partial z^2} = - \frac{\alpha(x)c^2(x)\beta(z)}{c_p(z)\rho(z)} J_0 e^{-\alpha z} f(t), \quad (1)$$

здесь введены следующие обозначения:  $\varphi$  – скалярный потенциал поля скоростей,  $v = \text{grad } \varphi$ ,  $c(x)$  – скорость распространения оптоакустической волны в жидкости,  $\alpha$  – коэффициент поглощения лазерных лучей,  $\rho(z)$ ,  $c_p(z)$ ,  $\beta(z)$  – плотность жидкости, ее теплоемкость при постоянном давлении и коэффициент объемного расширения, соответственно,  $\eta(z)$  – сдвиговая вязкость жидкости,  $\xi(z)$  – ее объемная вязкость,  $J_0$  – интенсивность лазерного излучения,  $J = J_0 \cdot f(t)$  – изменение со временем интенсивности лазерного излучения.

Эксперименты, проведенные нами в лабораторных условиях с образцами нефти, отобранными с различных глубин скважины, показали, что плотность и сдвиговая вязкость до глубины 3000–3500 м изменяются линейно. Линейные изменения указанных параметров нефтей с глубиной являются частным случаем более общего закона изменения – экспоненциального. Поэтому можно записать:

$$\eta(z) = \eta_0 \exp(k_1 z) \xi(z) = \xi_0 \exp(k_1 z) \rho(z) = \rho_0 \exp(k_2 z). \quad (2)$$

Разумно будет предположить, что и остальные теплофизические параметры нефти с глубиной скважины изменяются по схожим законам, т.е. формально близкими зависимостям (2), другими словами:

$$c_p(z) = c_{p0} \exp(k_3 z) \beta(z) = \beta_0 \exp(k_4 z). \quad (3)$$

Согласно результатам эксперимента в лабораторных условиях, акустические свойства нефтей с глубиной также изменяются по экспоненциальному закону:

$$c(z) = c_0 \exp(k_5 z) \alpha(z) = \alpha_0 \exp(k_6 z). \quad (4)$$

Применяя спектральный метод к решению дифференциального уравнения (1) при условиях (2), (3) и (4) при нулевом начальном и соответствующих граничных условиях, можно построить точное аналитическое решение. Однако, полученное решение математически очень громоздко и неэффективно для практического использования и анализа. С привлечением метода детерминированных моментов можно оценить влияние характеристик среды (коэффициент поглощения, скорости акустических волн и длительность лазерного излучения) на форму акустического импульса. Полученная математическая модель может быть подвергнута некоторым упрощениям. В уравнении (1) можно пренебречь, как малыми величинами, влиянием теплопроводности и общей вязкости. В рамках полученной модели удастся определить оптимальные условия параметров оптоакустического сигнала, при которых фильтрационные характеристики пород максимальны.

## Литература

1. Горбачев Ю.И., Иванова Н.И., Никитин А.А. Методы воздействия на призабойную зону пласта с целью повышения добычи // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 5.
2. Прачкин В.Г., Муллакаев М.С., Асылбаев Д.Ф. Повышение продуктивности скважин методом акустического воздействия на высоковязкие нефти в каналах призабойной зоны скважины // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 9. – С. 15–19.

## References

1. Gorbachev Yu.I., Ivanova N.I., Nikitin A.A. Methods of influence on the bottom-hole formation zone for the purpose of production increase // Oil economy. – 2002. – № 5.
2. Prachkin V.G., Mullakaev M.S., Asylbaev D.F. Well productivity increase by an acoustic influence method on the high-viscosity oils in the channels of the well bottomhole zone // Chemical and oil-and-gas machine building. – 2014. – № 9. – P. 15–19.