Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2022, №6, Том 14 / 2022, No 6, Vol 14 https://esj.today/issue-6-2022.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/24NZVN622.pdf

DOI: 10.15862/24NZVN622 (https://doi.org/10.15862/24NZVN622)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Измайлова, Г. Р. Тепловой эффект при акустическом воздействии на нефтяной пласт / Г. Р. Измайлова // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 6. — URL: https://esj.today/PDF/24NZVN622.pdf DOI: 10.15862/24NZVN622

For citation:
Izmailova G.R. Thermal effect of acoustic impact on the oil reservoir. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(6): 24NZVN622. Available at: https://esj.today/PDF/24NZVN622.pdf. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.15862/24NZVN622

Измайлова Гульнара Ришадовна
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
Институт нефти и газа (филиал), Октябрьск, Россия
Доцент кафедры «Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений»
Кандидат физико-математических наук
E-mail: Gulena-86@mail.ru

Тепловой эффект при акустическом воздействии на нефтяной пласт

Аннотация. В работе рассматривается эффект нагрева нефтенасыщенного пласта при распространении в нем высокочастотных акустических волн, вследствие их поглощения насыщенной пористой средой. Предполагается, что при этом в пласте создаются объемные тепловые источники. Показана плотность распределения тепловых источников в пористой среде при различных мощностях и частотах акустических волн. В работе приведена математическая модель расчета поля температур в пористой насыщенной среде при акустическом воздействии с излучателем, расположенным напротив обрабатываемого пласта. Предполагается, что радиус акустического излучателя равен радиусу скважины, а длина излучателя равна мощности обрабатываемого пласта. Кроме того, учитывается эффект увеличения эффективной теплопроводности пласта при расчете распределения температурного поля. Считается, что скважина работает без остановки с определенным дебитом нефти, зависящим от вязкости нефти. Задача решается численным методом конечных разностей по неявной схеме в цилиндрической системе координат. В работе автором приведены результаты исследований тепловых эффектов, возникающих в пласте, а именно, увеличение эффективной теплопроводности пласта и возникновение источников тепла при распространении акустических волн в пласте. Таким образом, в статье приводятся результаты расчетных исследований, учитывающих только тепловые эффекты при обработке пласта волновым (акустическим) методом. Обработка пласта волновыми методами (акустическими, звуковыми, гидроударными, упругими и так далее) является одним из перспективных методов как повышения нефтеотдачи, так и интенсификации добычи нефти, поэтому теоретическое исследование процессов, возникающих при взаимодействии волн с насыщенной пористой средой носит значительный характер.

Ключевые слова: нефтяной пласт; скважины; акустический излучатель; тепловые источники; температурное поле; трудноизвлекаемые запасы; вязкость

Введение

Все большее внимание исследователей привлекают современные методы добычи трудноизвлекаемых запасов углеводородов, как в России, так и за рубежом. Это связано, в первую очередь, с возрастанием доли месторождений нефти и газа, характеризующимися как «трудноизвлекаемые запасы углеводородов». Во-вторых, с истощением уже традиционных запасов нефти и газа, с переводом их на заключительную стадию разработки. При этом множество методов увеличения нефтеотдачи имеет ряд ограничений, либо недостатков, вызывающих сомнения для их дальнейшего применения.

К трудноизвлекаемым запасам относятся запасы углеводородов, сосредоточенные в карбонатных и малопроницаемых (менее 0,05 мкм^2) с высокой зональной и послойной неоднородностью терригенных коллекторах, представленных глинистыми песчаниками, алевролитами, переслаивающимися разностями аргилитоподобных алевритов, а также запасы высоковязких (более 60 мПа·с) нефтей и водонефтяных зон и нефтяных оторочек [1].

По различным источникам доля трудноизвлекаемых и малоэффективных запасов в России составляет около 65 % [1]. Причем если не осваивать трудноизвлекаемые запасы, то через 10–15 лет, по различным оценкам, добыча нефти в России сократится в 2–4 раза [2–4].

Разработка объектов в таких условиях по известным технологиям, в том числе с применением физико-химических методов, малоэффективна. Метод массированного гидравлического разрыва пласта (ГРП) также имеет серьезные ограничения, так как, повышая дебит скважин, наличие трещин значительной протяженности увеличивает неоднородность пласта и, следовательно, может снизить нефтеотдачу пласта в целом [4].

В последние годы внимание исследователей все в большей мере привлекают методы, основанные на использовании энергии физических полей (электромагнитных, тепловых, упругих и т. д.), а также на комбинировании энергии поля с традиционными методами повышения нефтеотдачи пластов. Как показывают результаты авторов [5; 6] и промысловый опыт, серьезную перспективу имеет использование волновых методов (акустических, вибрационных, вибросейсмических, гидроволновых, импульсно-ударных и т. д.). При этом остаются неизученными многие вопросы, связанные с применением волновых методов, что и ограничивает их массовое применение с целью обработки всего пласта, либо призабойной зоны.

Одним из малоизученных вопросов являются тепловые процессы, возникающие в насыщенной пористой среде при наложении акустических волн. Термоакустический эффект описан авторами в работе [1] в лабораторных условиях. Ими же приведена эмпирическая формула для расчета эффекта увеличения теплопроводности модели пласта (насыпной песок, насыщенный нефтью) в акустическом поле. Найденное авторами [1] критическое значение интенсивности акустического поля, соответствует частному случаю.

Таким образом, процессы теплопереноса в насыщенном поровом пространстве в присутствии акустического поля требуют дальнейшего развития и изучения.

1. Необходимо, во избежание путаницы, выделить следующее обстоятельство. Понятие «волновой процесс» можно вводить и судить о волновом воздействии на ту или иную материальную среду, лишь начиная с расстояния от источника возмущения L большем, чем vT, где L — линейный размер системы, v — скорость распространения возмущения, T — время его изменения [7–8]. При расстояниях $L < vT$ можно говорить лишь о зонах формирования волны. Волновое движение может совершаться в гармоническом (непрерывном) и в импульсном режимах. В этом смысле под понятие волны попадают акустические, тепловые и импульсные гидродинамические возмущения, распространяющиеся в пространстве под действием постоянно действующих или мгновенных термо-массо или баро-градиентных полей.

Воздействие на нефтяные и газовые коллекторы различными по своему характеру волновыми полями в общем случае сопровождается быстроменяющимися и значительными градиентами температуры, давления и насыщенности. Это приводит к интенсификации и усилению фазовых переходов, а также фильтрационных и диффузионных процессов переноса [9].

В частности, акустическое поле интенсивностью не менее 10 Вт/м^2 в насыщенной пористой среде приводит к таким эффектам как увеличение теплопроводности пласта, фазовой проницаемости. Следовательно, вызывает интенсификацию процессов тепло-, массообмена в пористых средах. Кроме того, авторами работ [10; 11] установлены ряд других эффектов, возникающих в пласте, таких как: звуковой ветер, т. е. усредненное постоянное течение жидкости или газа вблизи источника звука, внутрипоровая турбулизация, вынужденная конвекция флюида и т. д.

В пористых средах при распространении акустических волн имеет место диссипация энергии и дисперсия обмена импульса и температуры между фазами [12–14]. Вязко-инерционные и тепловые процессы обмена между фазами определяют существование некоторого времени релаксации, в течение которого среда приходит в движение под действием вынуждающей силы. Для горных пород τ меняется от $2\cdot10^{-3}$ с (песок) до 10^{-9} с (глина).

Если время релаксации τ намного меньше периода колебаний T, среда успевает следовать за возмущением и происходит обмен импульсом между фазами. А если $\tau >> T$ среда «заморожена». Среда не успевает следовать за возмущением [15].

Таким же образом происходит термическая релаксация: при $\tau_т << T$ между фазами происходит быстро и температуры фаз успевают выравниваться ($T_1 = T_2$). Когда $\tau_т >> T$, температуры фаз не равны. Приблизительно можно полагать, что тепловое расширение фаз влияет только на объёмные деформации, т. е. на продольную волну 1-го рода [16].

Из-за наличия инерционной и термической релаксаций происходит поглощение звуковой энергии, т. е. преобразование её в тепловую энергию. Суммарный коэффициент поглощения равен: $\alpha_a = \alpha_и + \alpha_т$, где $\alpha_и$ — означает инерционное поглощение энергии, а $\alpha_т$ — термическое [17].

Таким образом, в данной работе оценивается тепловой эффект вследствие поглощения звуковой (акустической) энергии и возникновении при этом объемных тепловых источников в пласте. В качестве ультразвукового излучателя акустических волн в пласт используется гирлянда пьезокерамических преобразователей, которые равномерно расположены по всей толщине пласта. Генератор акустических волн находится на устье скважины и соединен с преобразователями кабелем.

Рассмотрим неизотермический процесс фильтрации однокомпонентной системы плотностью ρ_f, удельной теплоемкостью c_f и скоростью фильтрации v_f в горизонтальном пласте в акустическом поле. Распределение температуры в пласте в цилиндрических координатах будет является решением следующего уравнения [17]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_a\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{v_f\rho_f c_f}{C_p}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{q_a}{C_p} \quad (1)$$

где C_p — объемная теплоемкость пород пласта; λ_a — коэффициент теплопроводности пород пласта; q_a — объемные тепловые источники; ρ_f, c_f — плотность и удельная теплоемкость пластового флюида.

Скорость нефти (однокомпонентной системы) определяется из выражения [4]:

$$\nu_f = \frac{Q_0}{2\pi rh}\frac{\mu_0 ln(r_k/r_0)}{\int_{r_0}^{r_k}\frac{\mu(T)}{r}dr}, \quad (2)$$

где Q_0 — первоначальный дебит скважины (до воздействия); r_k — радиус контура питания скважины; r_0 — радиус скважины; h — мощность пласта; $\mu(T)$ — динамическая вязкость нефти, зависящая от температуры по закону [18]:

$$\mu(T) = \mu_0 exp\big(-\gamma(T - T_0)\big), \quad (3)$$

где γ — температурный коэффициент; μ_0 — вязкость нефти при температуре T_0; T_0, T — начальная и текущая температура пласта соответственно.

Объемные тепловые источники, создаваемые в пласте при распространении акустического поля, определяются выражением [17]:

$$q_a = \frac{\alpha_a \beta_a N_{a0}}{\pi r_0 h}\frac{\left|H_0^{(2)}(\dot{k}_a r)\right|^2}{Re\left\{j\dot{k}_a^* H_0^{(2)}(\dot{k}_a r_0) H_1^{(2)}(\dot{k}_a^* r_0)\right\}} \quad (4)$$

где Re — действительная часть комплексной величины; индекс «*» означает комплексно-сопряженную величину; α_a, β_a — коэффициенты затухания и фазы акустических волн, распространяющихся в пласте, $\dot{k}_a = \beta_a - j\alpha_a$; $\beta_a = \frac{\omega_a}{\nu_a}$ — коэффициент фазы акустических волн; $\alpha_a = \delta_p$, — коэффициент затухания акустических волн по интенсивности, $H_0^{(2)}, H_1^{(2)}$ — функция Ханкеля 2-го рода нулевого и первого порядка, N_{a0} — мощность излучателя акустических волн.

Коэффициент теплопроводности зависит от интенсивности акустического поля следующим образом [1]:

$$\lambda_a = \begin{cases} \lambda_0 + AI(r), I(r) \geq I_{\text{кр}} \\ \lambda_0, I(r) < I_{\text{кр}} \end{cases}, \quad (5)$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности в отсутствии акустического поля; A — экспериментально определяемый малый параметр; $I_{кр}$ — минимальная интенсивность акустического поля, необходимая для увеличения эффективной теплопроводности (для песка $I_{кр}$ = 840 Вт/м^2), $I(r)$ — интенсивность акустического поля, которая определяется по формуле [19]:

$$I(r) = I_0\left|H_0^{(1)}(\dot{k}_a r)\right|^2, \quad (6)$$

где I_0 — интенсивность излучателя при $r = r_0$.

Для однозначности полученных решений, примем граничные и начальные условия. Температура в пласте во всех точках в начальный момент времени одинакова [17]:

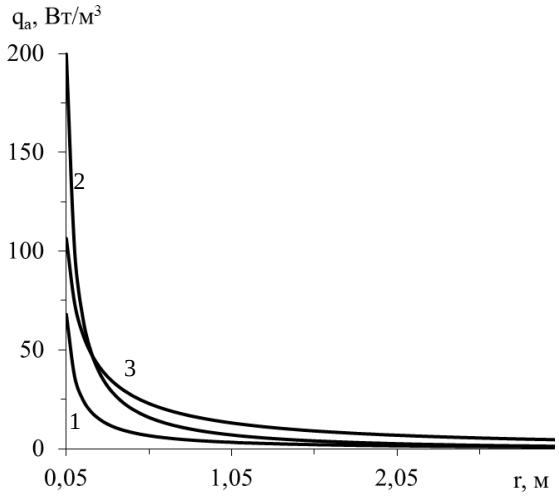
$$T(r, 0) = T_0. \quad (7)$$

Граничные условия при $r = r_0$ на забое скважины и при $r = r_k$ на радиусе контура питания представим в следующем виде [17]:

$$\frac{\partial T(r_0, t)}{\partial r} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T(r_k, t)}{\partial r} = 0. \quad (9)$$

2. Задача (1)–(9) решалась численно методом конечных разностей по неявной схеме. Распределения тепловых источников, возникающих в насыщенной пористой среде при распространении акустических волн, показаны на рисунке 1 при различных мощностях акустического генератора и частоте волн.

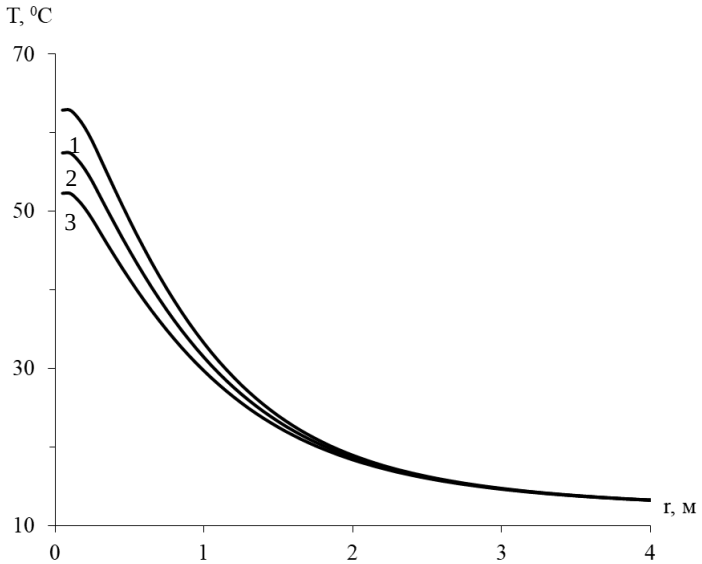


1 — N_{a0} = 1,5 кВт, f_a = 6 кГц; 2 — N_{a0} = 1,5 кВт, f_a = 16 кГц; 3 — N_{a0} = 10 кВт, f_a = 22 кГц

Рисунок 1. *Распределение тепловых источников в пласте, возникающих при акустическом воздействии.*

На рисунке 1 видно, что с увеличением частоты акустических волн (кривые 1 и 2) происходит повышение плотности тепловых источников в ближней зоне скважины, когда как увеличение мощности генератора волн вызывает увеличение радиуса теплового влияния.

Решением системы уравнений (1)–(9) является распределение температуры в пласте при акустическом воздействии на рисунке 2 при различных начальных дебитах скважины. Радиус нагрева пласта через 5 суток после воздействия составляет около 2 м. Видно, что с увеличением дебита скважины температура в пласте уменьшается, так как тепло уноситься вместе с нефтью из пласта.



1 — Q_0 = 0,1 м^3/сут.; 2 — Q_0 = 0,5 м^3/сут.; 3 — Q_0 = 1 м^3/сут.

Рисунок 2. *Распределение температурного поля в пласте в момент времени t = 5 суток после начала воздействия. Na0 = 10 кВт*

Существование минимального значения мощности акустических волн N_{a0min}, при котором увеличивается теплопроводность пласта, следует из того, что существует минимальное значение интенсивности акустического поля I_{min} = 840 Вт/м^2, при котором увеличивается теплопроводность пласта. При минимальном значении интенсивности акустического поля I_{min} получается минимальное значение мощности излучателя акустических волн [17]:

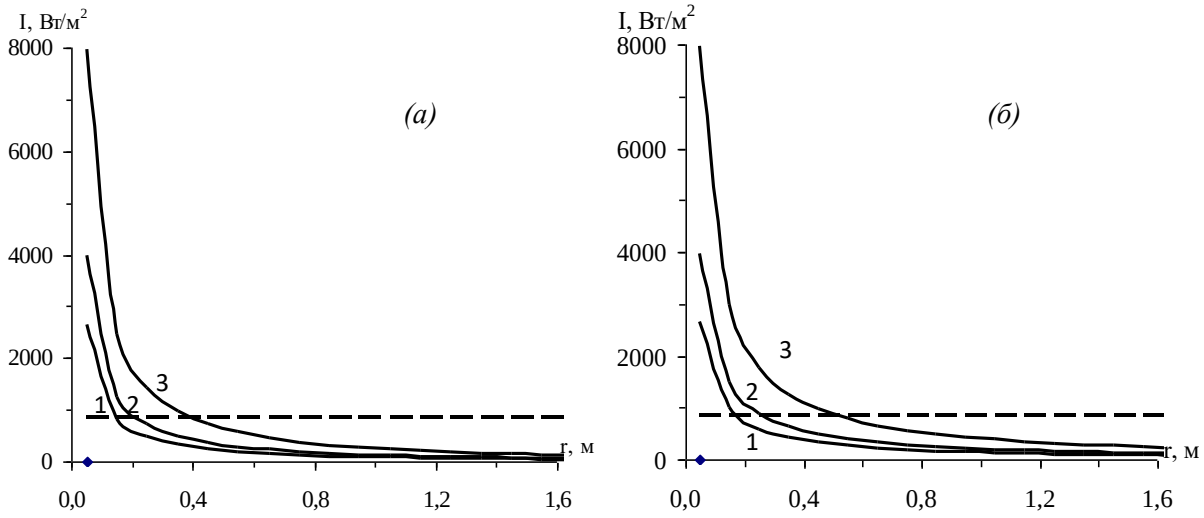
$$N_{a0min} = I_{min} 2\pi r_0 h. \quad (10)$$

Для расчетов возьмем следующие значения: радиус скважины r_0 = 0,05 и 0,1 м; мощность пласта h = 4, 8 и 12 м. По формуле (10), получаем минимальные величины мощности акустического генератора, при котором происходит увеличения эффективной теплопроводности пласта:

1. r_0 = 0,05 м; h = 4 м — N_{a0min} = 1,056 кВт.
2. r_0 = 0,05 м; h = 8 м — N_{a0min} = 2,111 кВт.
3. r_0 = 0,05 м; h = 12 м — N_{a0min} = 3,167 кВт.
4. r_0 = 0,1 м; h = 4 м — N_{a0min} = 2,11 кВт.
5. r_0 = 0,1 м; h = 8 м — N_{a0min} = 4,22 кВт.
6. r_0 = 0,1 м; h = 12 м — N_{a0min} = 6,33 кВт.

При значениях мощности генератора ниже рассчитанных — акустическое поле не влияет на процесс кондуктивного переноса тепла и теплопроводность пласта остается постоянной величиной.

Из вышеприведенных расчетов видно, что для обработки пласта генератор акустических волн должен быть подобран с учетом радиуса скважины и толщины обрабатываемого пласта. Допустим, включение генератора мощностью N_{a0} = 1,5 кВт в скважине радиусом r_0 = 0,05 м и мощностью пласта h = 4 м приведет к возникновению термоакустического эффекта (увеличению эффективной теплопроводности), когда как при включении такого же генератора в пласте мощностью в 2 раза выше термоакустического эффекта не ожидается [18–20].



1 — h = 12 м; 2 — h = 8 м; 3 — h = 4 м

Рисунок 3. *Распределение интенсивности акустического поля. r_0 = 0,05 м: (а) f_a = 22 кГц; (б) f_a = 6 кГц*

Распределения интенсивности акустического поля $I(r)$ при N_{a0} = 10 кВт; f_a = 22 кГц и f_a = 6 кГц, приведены на рисунке 3. На рисунках горизонтальной пунктирной линий указано минимальное значение интенсивности акустического поля, при котором происходит увеличение теплопроводности среды. По этой линии можно определить, до какой глубины увеличивается теплопроводности среды [18].

Относительное увеличение эффективной теплопроводности среды в зависимости от различных значений радиуса скважины и толщины пласта приведено в таблице 1.

Таблица 1

Относительное увеличение эффективной теплопроводности при различных значениях радиуса скважины r_0 и толщины пласта h

	r_0 = 0,05 м	r_0 = 0,1 м
h = 12 м	1,73	1,365
h = 8 м	2,09	1,55
h = 4 м	3,19	2,1

Как видно из полученных результатов, эффективность акустического воздействия на пласт зависит от радиуса скважины, частоты акустического поля и толщины пласта. Чем они меньше, тем на большем расстоянии от скважины наблюдается увеличение эффективной теплопроводности пласта.

Выводы

Таким образом, в статье были рассмотрены некоторые тепловые эффекты, возникающие в пласте при распространении высокочастотных акустических волн (более 1 кГц). Выявлено, что объемные тепловые источники сосредоточены в основном вблизи скважины и в призабойной зоне пласта (в радиусе до 2 м). Кроме того, рассмотрен эффект увеличения эффективной теплопроводности при воздействии акустическим излучателем в насыщенной пористой среде. Обнаружено, что увеличение теплопроводности пласта зависит от геометрических размеров скважины (предполагается, что радиус излучателя равен радиусу скважины), от частоты акустического поля и толщины пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сургучев М.Л., Кузнецов О.Л., Симкин Э.М. Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклическое воздействия на нефтяные пласты — М.: Недра, 1975. — 184 с.
2. Саяхов Ф.Л., Фатыхов М.А., Кузнецов О.Л. Исследование электромагнитно-акустического воздействия на распределение температуры в нефтеводонасыщенной горной породе // Известия ВУЗов. Нефть и газ. — 1981. — № 3. — С. 36–40.
3. Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. — М.: Недра, 1983. — 192 с.
4. Марфин Е.А., Гаврилов А.Г., Абдрашитов А.А. Моделирование нестационарной фильтрации при акустическом воздействии на пласт. В сборнике: Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сборник трудов 8-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. 2019. С. 63–69.

5. Герасимов Н.М. Исследование акустического воздействия на пласт с целью извлечения остаточных запасов нефти. В сборнике: Интеллектуальный потенциал XXI века. сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. 2019. С. 132–134.

6. Хусаинов И.Г. Нагрев неоднородной пористой среды, насыщенной жидкостью, с помощью акустического поля: Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества. — М.: ГЭОС. — 2006. — Т. 1. — С. 204–207.

7. Хусаинов И.Г. Тепловые процессы при акустическом воздействии на насыщенную жидкостью пористую среду // Вестник Башкирского университета. — 2013. — Т. 18. — № 2. — С. 350–353.

8. Френкель Я.И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. Сер. География и геофизика. — 1944. — Т. 8. — № 4. — С. 134–150.

9. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. Механика насыщенных пористых сред. — М.: Недра, 1970. — 384 с.

10. Ноздрев А.Ф. Молекулярная акустика. — М.: Московский областной педагогический институт, 1963. — 217 с.

11. Исакович М.А. Общая акустика. Учебное пособие. — М.: Наука, 1973. — 496 с.

12. Вахитов Г.Г., Кузнецов О.Л., Симкин Э.М. Термодинамика призабойной зоны нефтяного пласта. — М.: Недра, 1978. — 216 с.

13. Гадиев С.М. Использование вибрации в добыче нефти. — М.: Недра, 1977. — 197 с.

14. Biot M.A. «Theory of propagation of elastic waves in a fluid — saturated porous solid», part I, II // J. Acoust. Soc. Amer. — 1956. — V. 28. — №2. — P. 101–106.

15. Geertsma J., Smit D.C. Some aspect of elastic waves propagation of sandstone // Geophysics. 1961. vol. 26. No 2.

16. Geertsma J. Velocity-log interpretation effect of rock bulk compressibility. // J. Soc. Petr. Eng. 1961. No 4.

17. Измайлова Г.Р., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Математическое моделирование совместного воздействия высокочастотного электромагнитного и акустического полей на нефтяной пласт. — Нефтегазовое дело. — 2014. — № 4. — С. 127.

18. Izmaylova G.R. Acoustically induced mass transfer in saturated porous media. В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Сер. "International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering, IPDME 2020" 2021. С. 012073.

19. Измайлова Г.Р., Ковалева Л.А. Распределение плотности тепловых источников, возникающих в нефтенасыщенном пласте при поглощении высокочастотных акустических и электромагнитных волн. Инженерно-физический журнал. — 2021. — 94. № 5. — С. 1196–1204.

20. Максимов Г.А. Требования к скважинным излучателям на основе аналитической оценки излучаемых ими акустических полей. Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 3. С. 301.

Izmailova Gulnara Rishadovna
Ufa State Petroleum Technical University
Institute of Oil and Gas (branch), Oktyabrsk, Russia
E-mail: Gulena-86@mail.ru

Thermal effect of acoustic impact on the oil reservoir

Abstract. The paper considers the effect of heating an oil-saturated reservoir during the propagation of high-frequency acoustic waves in it, due to their absorption by a saturated porous medium. It is assumed that in this case, volumetric heat sources are created in the reservoir. The density of distribution of heat sources in a porous medium at various capacities and frequencies of acoustic waves is shown. The paper presents a mathematical model for calculating the temperature field in a porous saturated medium under acoustic influence with an emitter located opposite the treated reservoir. It is assumed that the radius of the acoustic radiator is equal to the radius of the well, and the length of the radiator is equal to the power of the treated reservoir. In addition, the effect of increasing the effective thermal conductivity of the formation is taken into account when calculating the distribution of the temperature field. It is believed that the well works without stopping with a certain oil flow rate, depending on the viscosity of the oil. The problem is solved by the numerical method of finite differences according to an implicit scheme in a cylindrical coordinate system. In this paper, the author presents the results of studies of thermal effects occurring in the formation, namely, an increase in the effective thermal conductivity of the formation and the occurrence of heat sources during the propagation of acoustic waves in the formation. Thus, the article presents the results of computational studies that take into account only thermal effects during the treatment of the formation by the wave (acoustic) method. The treatment of the reservoir by wave methods (acoustic, sound, water hammer, elastic, and so on) is one of the promising methods for both increasing oil recovery and intensifying oil production, therefore, the theoretical study of the processes arising from the interaction of waves with a saturated porous medium is significant.

Keywords: oil reservoir; wells; acoustic radiator; thermal sources; temperature field; hard-to-recover reserves; viscosity