

UDC 532.546:537.868+53:51

**MATHEMATICAL MODELLING OF INFLUENCE  
OF RADIO-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC AND ACOUSTIC  
FIELDS ON OIL LAYER**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕЩНОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ НА  
НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ**

G.R. Izmaylova, L.A. Kovaleva, N.M. Nasyrov

FSBEI HPE “Ufa State Petroleum Technological University”

Branch, Oktyabrsky, Russian Federation

FSBEI HPE “Bashkir state university”, Ufa, Russian Federation

Измайлова Г.Р., Ковалева Л.А., Насыров Н.М.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический  
университет», филиал г. Октябрьский, Российская Федерация

ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет»,

г. Уфа, Российская Федерация

e-mail: gulena-86@mail.ru

**Abstract.** The combined effects high frequency (HF) electromagnetic (EM) and acoustic fields to the porous environment introduce interest, because appearing new cross appearance - thermoacoustic effect [1-3]. In particular, was determine appearance of augmentation effective heat-conducting of saturating porous substance at combination conducted warming with reaction waves of sound frequency (the thermoacoustic effect) [4, 5]. As a result, significantly increased the heat penetration of the layer.

It is evident, interaction intensive HF EM and acoustic fields in saturated a porous medium could take place in a specific thermoacoustic influence, when

thermal field shall be created in environment for account of swallowing up of energy EM and acoustic fields, appearance of distributed heat sources and an intensive heat transfer to the inland of the environment. Hence, more important of factor HF electromagnetic and acoustic influence is the really of the growth rate of the warming-up of the layer and the radius of influence compared with thermoacoustic influence. Therefore speech maybe about deep warming-up of petroleum of the oil.

The application of HF electromagnetic and acoustic influence will allow to solve a lot of next practical problems:

1. To grow coefficient of oil recovery and intensification of rate development field, which contents highly viscous and highly paraffinic oils, to increase production wells.

2. To increase effective thermal methods for influence to the well bottom zone and the reservoir as a whole.

3. In injection wells to enlarge injectivity bottomhole zone and an indicator of coverage of layer by powerful.

**Аннотация.** Совместное воздействие высокочастотного (ВЧ) электромагнитного (ЭМ) и акустического полей на насыщенные пористые среды представляет интерес, прежде всего из-за возникновения новых перекрестных явлений – термоакустического эффекта [1-3]. В частности, было установлено явление увеличения эффективной теплопроводности насыщенных пористых тел при совмещении кондуктивного прогрева с воздействием волнами звуковой частоты (термоакустический эффект) [4, 5]. Благодаря этому значительно увеличивается глубина прогрева пласта. Очевидно, взаимодействие интенсивных ВЧ ЭМ и акустических полей в насыщенной пористой среде может проявляться в специфическом термоакустическом воздействии, когда тепловое поле создается в среде за счет поглощения энергии ЭМ и акустического полей, появления распределённых источников тепла и интенсивного переноса тепла вглубь среды. Следовательно, наиболее важной особенностью ВЧ

электромагнитно-акустического воздействия является существенное увеличение темпа прогрева пласта и радиуса воздействия по сравнению с термоакустическим воздействием. Поэтому речь может идти о глубоком прогреве нефтяного пласта в целом.

Применение ВЧ электромагнитно-акустического воздействия позволит решить следующие практические задачи:

- увеличить коэффициент нефтеотдачи и интенсификацию темпов разработки месторождений, содержащих высоковязкие и высокопарафинистые нефти, повысить производительность скважин;

- повысить эффективность тепловых методов воздействия на призабойную зону и пласт в целом;

- в нагнетательных скважинах увеличить приемистость призабойной зоны пласта и коэффициент охвата пласта по мощности.

**Key words:** thermoacoustic effect, the acoustic impact, longitudinal wave, shear wave, factors of attenuation, thermal sources, the temperature field, bottomhole.

**Ключевые слова:** термоакустический эффект, акустическое воздействие, продольная волна, поперечная волна, коэффициент затухания, тепловые источники, температурное поле, призабойная зона пласта.

### **Interection EM field with substance**

In conjunction electromagnetic field with environment, on the will many diverse processes, phenomena and effects. One such effect is the appearing resources of warming, can cause a warming of environment.

As an example of such new technology, involving the use EM fields are using HF wave and microwave in development of the deposit with complicated physical-technology condition: highly viscous and paraffinic oils, bitumen, oil shale [1], in this time reserve of more than oil reserve.

The application HF wave and microwave EM fields and also combination their with other sorts of fields (thermal, acoustic, elastic, hydrodynamic [6-10, 3]) allows to avoid and effectively to delete different formations from bottom-hole zones, to reduce fluid's viscosity and therefore to intensified his production. Owing to the volumetric nature of warming-up and possible control to the frequency EM field, powerful of radiator EM wave, EM influence to the environment have some advantage in front of other methods influence.

Energy of EM waves on the different field's frequency absorbed of variables. So, waterless raw petroleum absorbed of energy in the frequency range from 50 GHz - 100 MHz [11]. Maximum absorption for different petroleum is near 10 MHz (HF wave). The absorption of EM energy until frequency 1 MHz pre-conditioned cross-cutting an environment and events orientation molecular polarization in the megahertz range. Maximum absorbed near frequency 10 MHz explained by the presence in petroleum heavy polar ingredients. The water absorbed by energy in range frequency 1-30 GHz (microwave spectrum). Consequently and the productive petroleum collector can absorbed energy EM waves in this range of frequency advantage, because it is oil-saturated a porous environment with significant content of mineralized water. Therefore its dielectric properties and his frequency characteristics depend on from volume ratios phases with different electrical properties.

### **The acoustic influence to the saturated rocks.**

By theoretical researches of M.A. Bio, in general, by the dissemination acoustic waves in the saturated a porous environment exist three kinds of waves: one diametrical wave and two longitudinal wave (waves of expansion 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> kinds).

Phase speed  $v_a$  and coefficients of absorption  $\alpha_a$  diametrical(1<sup>st</sup> kind) and longitudinal waves [3] are the main parameters that characterize process of dissemination acoustic waves in saturated a porous environment.

In general to the speed and meaning of coefficient wave's absorption in

condition oil and gas collector can influence the next factors: 1) porosity  $m$ , 2) degree of cementation grains, 3) rock pressures  $P_r$ , 4) hydrodynamic pressure of fluid  $P_f$ , 5) saturation fluid's kind, 6) temperature  $T$ , 7) sound field's frequency  $\omega_a$   $P_r = 2\pi f_a$  and etc.

The porous mediums are dissipation and had comparative by dispersion impulse exchange and heat between phases [12]. In this connection by the action urging power, an environment no once had behind motion, and in some time of relaxation  $\tau$ . It is defined by process of exchange between phases: viscous-inertial (impulse exchange between phases) and thermal (alignment of temperature). The range of change  $\tau$  in rocks is big -  $2 \cdot 10^{-3}$  s for gravel and until  $10^{-9}$  s for clay.

The existence of inertial and thermal relaxation condition of absorption sound energy. In the cementation porous environment on the low frequency coefficient's absorption can be visualized as the crossing of two components:  $\alpha_a = \alpha_u + \alpha_T$ . First component is inertial absorption, second is the thermal.

## **The combined effects EM and acoustic waves to the oil reservoir and simultaneous selection of formation fluid**

### **The mission statement**

EM acoustic influence to the reservoir is described by the equation of thermal conductivity with volume thermal source, which arises in the environment by cause absorption energy of the two fields. In reservoir process of heat distribution relied flat radial (temperature depend on of cylindrical coordinate  $r$ ), coordinate's axis situated by axis well. In this case equation of thermal conductivity has aspect:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_a \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{v_f \cdot \rho_f \cdot c_f}{C_p} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{q_{a\omega}}{C_p}, \quad (1)$$

where is  $v_f = Q/2\pi r h$  – speed of filtration;  $\rho_f$ ,  $c_f$  – density and specific heat values of reservoir fluids;  $q_{a\omega}$  – thermal sources;  $\lambda_a$  – coefficient of reservoir's

heat conductivity;  $C_p$  – volume heat capacity;  $Q$  – oil flow rate, which defined out of expression:

$$Q = Q_0 \frac{\mu_0 \ln\left(\frac{r_k}{r_0}\right)}{\int_{r_0}^{r_k} \frac{\mu(T)}{r} dr} \quad (2)$$

It's  $Q_0$ ,  $r_0$  и  $r_k$  – primary flow rate, radius and radius by external boundary of well;  $\mu(T)$  – the dynamic oil viscosity, for temperature dependent by low:

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

where  $\gamma$  – temperature's coefficient,  $T_0$ ,  $T$  – start-up and current temperature,  $\mu_0$  – oil viscosity at a temperature  $T_0$ .

Total volume heat sources in environment, emerging of an impact EM and acoustic fields, can be represented as form:

$$q_{as} = q_a + q_s \quad (4)$$

where is  $q_s$  being definite of formula [13]:

$$q_s = \frac{\alpha_s \beta_s N_{s0}}{\pi r_0 h} \frac{|H_0^{(2)}(k_s r)|^2}{\operatorname{Re}\{jk_s^* H_0^{(2)}(k_s r_0) H_1^{(2)*}(k_s^* r_0)\}} \quad (5)$$

where is  $k_s = \omega_s \sqrt{\tilde{\epsilon}_a \mu_0} = \beta_s - j\alpha_s$  – ratio by propagation EM waves in resource;  $\omega_s = 2\pi f_s$  – EM waves frequency;  $\tilde{\epsilon}_a, \mu_0$  – absolute dielectric constant of medium (complex amount, magnetic permanent;  $\alpha_s$  и  $\beta_s$  – fading coefficient and EM waves phase ;  $j$  – unit imaginary;  $N_{s0}$  – EM waves' power the radiator;  $h$  – thickness of layer. Index «\*» is amount complex- highly risky;  $H_0^{(2)}(kr)$ ,  $H_1^{(2)}(kr)$  – Hunkel function;  $Re$  – really part of complex quantity.

Expression of allocated heat sources under the acoustic action on the layer  $q_a$  derived using methodology of work [14]. Received the next formula:

$$q_a = \alpha_a N_{a0} \frac{\exp(-\alpha_a (r - r_0))}{2\pi r h} \quad (6)$$

where is  $\alpha_a$  и  $N_{a0}$  – coefficient of attenuation and power of the transmitter of acoustic waves.

The dependence the thermal activity's coefficient from intensity acoustic waves adopted by linear [2].

$$\lambda_a = \begin{cases} \lambda_0 + AI(r), & I(r) \geq 840 \text{ Bm} / \text{M}^2 \\ \lambda_0, & I(r) < 840 \text{ Bm} / \text{M}^2 \end{cases} \quad (7)$$

where is  $\lambda_0$  – the thermal activity's coefficient with out of acoustic field;  $A$  – little parameter is expressed by experimental;  $I(r)$  – intensity of acoustic field is expressed by formula:

$$I(r) = I_0 \frac{\exp(-\alpha_a (r - r_0))}{\sqrt{r/r_0}}; \quad (8)$$

$I_0$  – intensity acoustic waves's transmitter on the wall of well.

**Boundary conditions.** In first time the temperature in layer is identical everywhere:

$$T(r, 0) = T_0. \quad (9)$$

Boundary conditions at the bottomhole of well and at the radius of external boundary has aspect (frontier of layer equally by radius of external boundary):

$$\left. \frac{\partial T(r_0, t)}{\partial r} \right|_{r_0 \rightarrow 0} = 0; \quad \frac{\partial T(r_k, t)}{\partial r} = 0. \quad (10)$$

### The solution of the problem and the analysis of results.

The calculations followings parameters determining of medium:  $T_0 = 12^\circ \text{C}$ ;  $\lambda_0 = 1.28 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $f_0 = 13.56 \text{ MHz}$ ;  $\alpha_0 = 0.0194 \text{ m}^{-1}$ ;  $\beta_0 = 0.778 \text{ m}^{-1}$ ;  $f_a = 6, 16 \text{ and } 22 \text{ kHz}$ ;  $\alpha_a = 0.1298; 0.346 \text{ and } 0.4758 \text{ m}^{-1}$ ;  $C_p = 1378000 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ;  $\rho_f = 949 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $c_f = 1873 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\mu_0 = 1.318 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\gamma = 0.064 \text{ K}^{-1}$ ;  $h = 8 \text{ m}$ ;  $A = 0.000352 \text{ m}/\text{K}$ ;  $r_0 = 0.05 \text{ m}$ ;  $N_{a0} = 1.5 \text{ и } 10 \text{ kW}$ ;  $N_{s0} = 20 \text{ and } 40 \text{ kW}$ ;  $Q_0 = 0.1, 0.5 \text{ and } 1 \text{ m}^3/\text{day}$ .

When holding calculations studies was using following parameters of acoustic field:  $N_{a0} = 1.5 \text{ kW}$  by frequency 6 kHz и 16 kHz [6] и  $N_{a0} = 10 \text{ kW}$  by frequency 22 kHz [12]. By power of the generator acoustic waves  $N_{a0}$  intensity acoustic waves  $I(r)$  shall be calculated according to the formulas  $I(r) = N_{a0}/(2\pi rh)$ . Calculations were made for discount absorption's viscous-inertial. In

calculations implicated that pores haven't a solid phase. For acoustic field's frequency 6, 16 and 22 kHz are from expressions of kinetic and potential energy and the Lagrange's equation for two phase porous medium [15, 16]. The coefficient's meaning of attenuation longitudinal wave 1<sup>st</sup> kind is  $\alpha_a = \delta_p = 0.1298$ ; 0.346 и 0.4758  $\text{m}^{-1}$ . By the cross waves have been neglected to the high meanings its coefficient's meaning of attenuation, at calculation we have  $\delta_s = 1.936$ ; 5.163 и 7.099  $\text{m}^{-1}$ . The absorption's coefficient of longitudinal wave 1<sup>st</sup> kind at the saturated by fluid porous medium is much smaller than coefficient of attenuation longitudinal wave 2<sup>nd</sup> kind [3]. Therefore at this medium propagate longitudinal wave 1<sup>st</sup> kind. So, coefficient of attenuation longitudinal wave 1<sup>st</sup> kind defines coefficient of attenuation acoustic waves by calculation  $\alpha_a = \delta_p$ .

Calculation showing that even not high power of acoustic generator ( $N_{a0} = 1.5$  kW), the thermal source giving contribution in summary thermal source near wells (figure 1). For a power high of acoustic generator ( $N_{a0} = 10$  kW), thermal source, giving the main contribution in summary thermal source near wells. So, the disregard thermal source, which creates by acoustic field, giving very big distorts the facts in thermal influence by acoustic field to the productive layer.

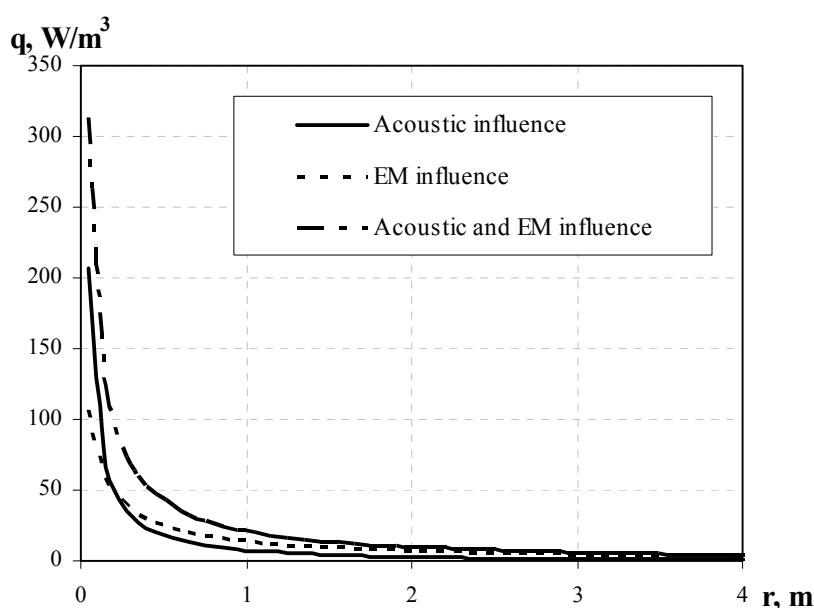


Figure 1. Distribution of thermal source in the layer:  
 $N_{90} = 20$  kW;  $N_{a0} = 1.5$  kW;  $f_a = 16$  kHz



For as radiator the transmitter it using of garland piezoelectric converters. Let us assume, garland's elements situated proportionally on the throughout the entire layer thickness. In this variant  $I_0$  – intensity of the transmitter on the chink's wall is expressed by this formula:

$$I_0(r_0) = \frac{N_{a0}}{2\pi r_0 h} \quad (11)$$

There is minimal value of intensity acoustic field  $I(r)$ , where is looking heat conductivity growth ( $I_{min}(r_0) = 840 \text{ W/m}^2$ ) suggest that there is minimal importance of the transmitter acoustic waves  $N_{a0min}$ , where is maybe increase of thermal activity in acoustic field. Formula (11) out of minimal importance of intensity acoustic field  $I_{min}(r_0)$  possible minimal importance of the transmitter acoustic waves:

$$N_{a0min} = I_{min}(r_0) 2\pi r_0 h \quad (12)$$

For conducting calculation holding used parameters of medium  $r_0=0.05, 0.1$  m;  $h = 4, 8$  и  $12$  m. Now, having plugged in the values into the formula, we can calculate it:

1.  $r_0 = 0.05$  m;  $h=4$  m –  $N_{a0min} = 1.055$  kW.
2.  $r_0 = 0.05$  m;  $h=8$  m –  $N_{a0min} = 2.11$  kW.
3.  $r_0 = 0.05$  m;  $h=12$  m –  $N_{a0min} = 3.165$  kW.
4.  $r_0 = 0.1$  m;  $h=4$  m –  $N_{a0min} = 2.11$  kW.
5.  $r_0 = 0.1$  m;  $h=8$  m –  $N_{a0min} = 4.22$  kW.
6.  $r_0 = 0.1$  m;  $h=12$  m –  $N_{a0min} = 6.33$  kW.

Values of power acoustic waves for this  $r_0$  and  $h$  – minimal when occurred an increasing of layer heat conductivity.

Distribution of the temperature in layer on different time when  $f_a=22$  kHz;  $h = 8$  m;  $r_0 = 0.05$  m;  $N_{a0} = 10$  kW;  $N_{\text{э}0} = 40$  kW;  $Q_0 = 0.5$  и  $1 \text{ m}^3/\text{day}$  shown at the figure 2-3.

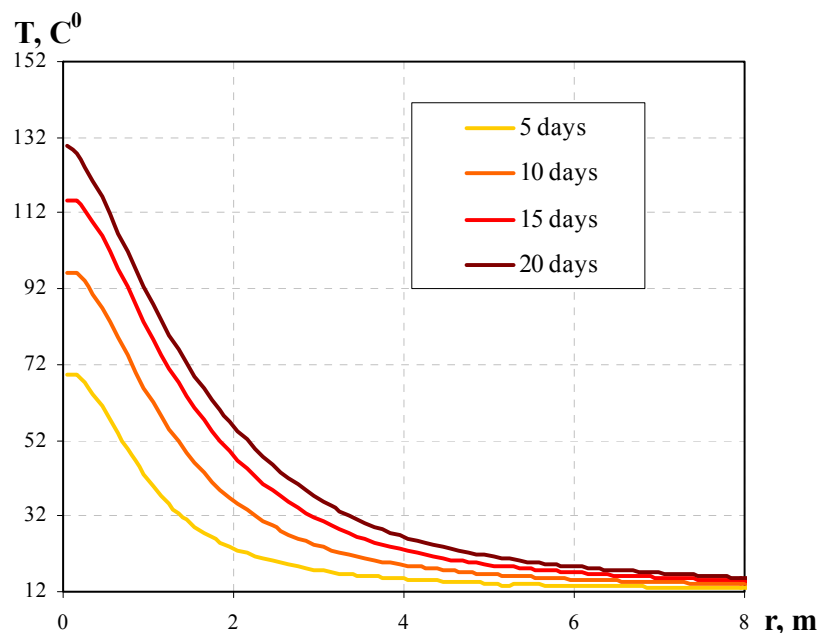


Figure 2. Distribution of the temperature in the layer:  
 $N_{\rho 0}=40$  kW;  $N_{a0}=10$  kW;  $Q_0=0.1$  m<sup>3</sup>/day

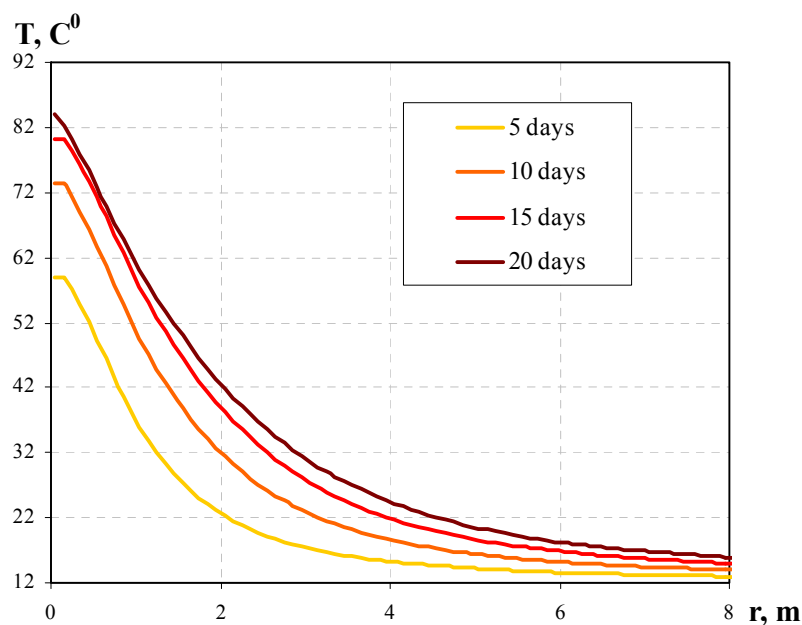


Figure 3. Distribution of the temperature in the layer:  
 $N_{\rho 0}=40$  kW;  $N_{a0}=10$  kW;  $Q_0=1$  m<sup>3</sup>/day

We see that at the pictures heating temperature decrease if flow rate of oil is increases, because by oil transported the warm that highlighted of the impact EM energy and acoustic waves. The tenfold increase of initial chink's flew rate reduction temperature in 1,5 times more. It is result of volume but not contact medium heating. Dynamics to changes in the temperature of the well's bottomhole and increase of flow rate showing at the figure 4 and 5. The figures

show that increase of flow rate's primary increase of temperature at the bottomhole and ongoing debit is slowing. The more flow rate of oil wells the more gained flow rate of oil wells and more effective the combined influence EM and acoustic fields to the oil layer (the table 1).

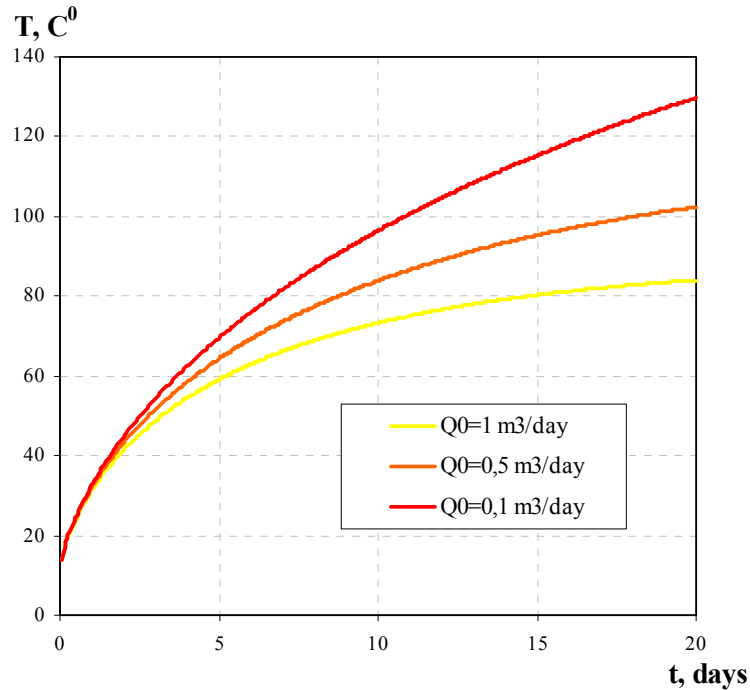


Figure 4. Dynamic of temperature on the bottomhole wells:  
 $N_{\text{э}0} = 40 \text{ kW}$ ;  $N_{\text{а}0} = 10 \text{ kW}$

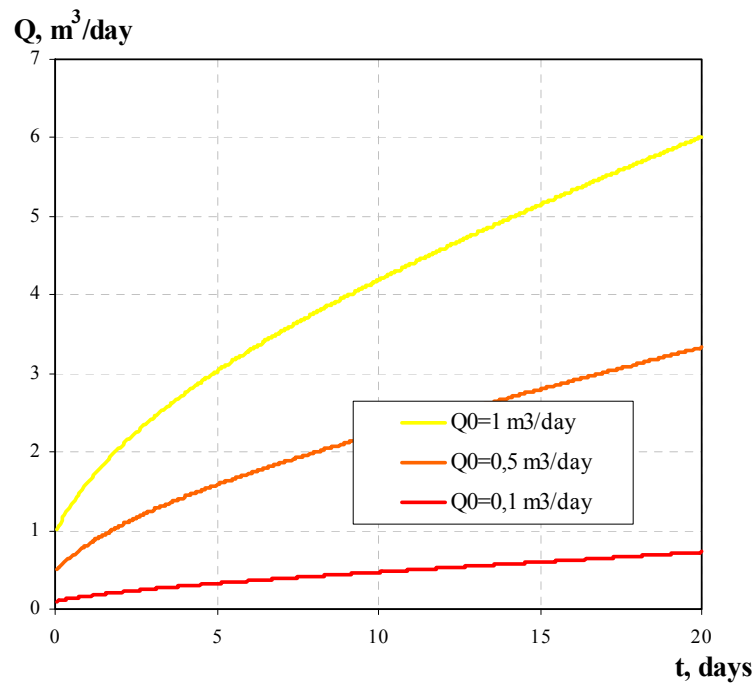


Figure 5. Dynamics of well flow rate:  $N_{\text{э}0} = 40 \text{ kW}$ ;  $N_{\text{а}0} = 10 \text{ kW}$

Table 1 reveals that more initial debit of the layer, the effective combined EM influence and acoustic fields to the oil layer. For instance, a tenfold increase initial debit of the layer will the significant growth to absolutely gained flow rate wells in case little decreasing initial debit of the layer. This is result volume heating of medium.

Table 1. The change well's flow rate after combined HF EM and acoustic influence.

Initial flow rate well, m <sup>3</sup> /day.	The gained flow rate well, m <sup>3</sup> /day.	Increasing flow rate well
$Q_0 = 0.1$	0.627	7.27 times
$Q_0 = 0.5$	2.83	6.66 times
$Q_0 = 1$	5.02	6.02 times

## Conclusions

1. This mathematical model and its numerical realization showing that interaction intensity HF EM and acoustic fields in saturated a porous medium could take place in a specific thermoacoustic influence, when thermal field shall be created in environment for account of swallowing up of energy EM and acoustic fields, appearance of distributed heat sources and an intensive heat transfer to the inland of the environment. Therefore more important of specialty HF electric magnetic and acoustic influence is the really of the growth rate of the warming-up of the layer and the radius of influence compared with thermoacoustic influence.

2. Was determines there are minimal importance of acoustic field transmitter when possibility notable increase thermal conductivity in the acoustic waves. Effective acoustic influence to the layer very depend on from radius of well and thickness of layer, there is the best if it is little.

3. The well flow rate increasing layer's tempo heating decrease, because by oil transported the warm that highlighted of the impact EM energy and acoustic waves. The more flow rate of oil wells the more gained flow rate of oil wells and more effective the combined influence EM and acoustic fields to the oil layer.

## Взаимодействие ЭМ поля с веществом

При взаимодействии внешнего ЭМ поля со средой, в ней проявляются множество разнообразных процессов, явлений и эффектов. Одним из таких эффектов является возникновение распределенных источников тепла, приводящих к нагреву среды.

Примером одной из сравнительно новых технологий, связанных с применением ЭМ полей, является использование ВЧ и СВЧ волн в разработке месторождений с осложненными физико-технологическими условиями: высоковязкие и парафинистые нефти, битумы, нефтяные сланцы [1], запасы которых в настоящее время превышают запасы обычных нефтей. Применение ВЧ и СВЧ ЭМ полей, а также комбинация их с другими видами полей (тепловым, акустическим, упругим, гидродинамическим [6-10,]) позволяет предупреждать и эффективно удалять различные отложения из призабойной зоны пласта, снижать вязкость флюида и таким образом интенсифицировать его добычу. Вследствие объемного характера нагрева и возможности управления им регулированием частоты ЭМ поля, мощности излучателя ЭМ волн, сочетанием с другими видами полей, ЭМ воздействие на среду имеет ряд преимуществ перед другими способами воздействия.

Энергия ЭМ волн на разных частотах поля поглощается по-разному. Так, безводные сырые нефти поглощают энергию в диапазоне частот 50–100 МГц [11]. Причем максимум поглощения для различных нефтей находится вблизи частоты 10 МГц (ВЧ волна). Поглощение ЭМ энергии до частот 1 МГц обуславливается сквозной проводимостью среды, а в мегагерцовом диапазоне – явлениями ориентационной молекулярной поляризации. Максимум поглощения вблизи частоты 10 МГц объясняется наличием в нефти тяжелых полярных компонентов. Вода поглощает энергию в диапазоне частот 1–30 ГГц (СВЧ диапазон). Соответственно и продуктивный нефтяной коллектор может поглощать энергию ЭМ волн

преимущественно в этих диапазонах частот, т.к. он в физическом отношении представляет собой нефтенасыщенную пористую среду часто со значительным содержанием минерализованной воды. Поэтому диэлектрические свойства его и их частотные характеристики зависят от объемного соотношения фаз с различными электрическими свойствами.

### **Акустическое воздействие на насыщенные горные породы**

По теоретическим исследованиям М.А. Био, в общем случае, при распространении акустических волн в пористой среде существует три типа волн: одна поперечная и две продольные (волны расширения 1-го и 2-го рода).

Основными параметрами, характеризующими процесс распространения акустических волн в насыщенной пористой среде, являются фазовые скорости  $v_a$  и коэффициенты поглощения  $\alpha_a$  продольных (1-го рода) и поперечных волн [3].

В общем случае на скорость и значение коэффициента поглощения волн в условиях нефтегазового коллектора могут влиять следующие факторы: 1) пористость  $m$ , 2) степень сцементированности зёрен, 3) горное давление  $P_g$ , 4) внутривпоровое (гидродинамическое) давление жидкости  $P_{жс}$ , 5) тип насыщающего флюида, 6) температура  $T$ , 7) частота звукового поля  $\omega_a = 2\pi f_a$  и др.

Пористые среды являются существенно диссипативными и обладают дисперсией обмена импульса и тепла между фазами [12]. В связи с этим под действием вынуждающей силы среда не сразу приходит в движение, а в течение некоторого времени релаксации  $\tau$ . Оно определяется в основном процессами обмена между фазами: вязко-инерционными (обмен импульса между фазами) и тепловыми (выравнивание температуры). Диапазон изменения  $\tau$  в горных породах довольно широк – от  $2 \cdot 10^{-3}$  с для песка до  $10^{-9}$  с для глины.

Существование инерционной и термической релаксации обуславливает поглощение звуковой энергии. В цементированных пористых средах на низких частотах коэффициент поглощения можно представить в виде суммы двух слагаемых:  $\alpha_a = \alpha_u + \alpha_T$ . Первое слагаемое связано с инерционным поглощением, а второе – с термическим.

## **Совместное воздействие ЭМ и акустического полей на нефтяной пласт и одновременный отбор пластового флюида**

### **Постановка задачи**

Электромагнитно-акустическое воздействие на пласт описывается уравнением теплопроводности с объемными тепловыми источниками, возникающими в среде за счёт поглощения энергии обеих полей. В пласте процесс распространения тепла полагается плоскорадиальным (температура зависит только от цилиндрической координаты  $r$ ), ось координат направлена вдоль оси скважины. В этом случае уравнение теплопроводности имеет вид:

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

где  $v_f = Q/2\pi r h$  – скорость фильтрации;  $\rho_f$ ,  $c_f$  – плотность и удельная теплоемкость пластового флюида;  $q_{aэ}$  – тепловые источники;  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности пласта;  $C_p$  – объемная теплоемкость;  $Q$  – расход отбираемой нефти, который определяется из выражения:

$$Q = Q_0 \frac{\mu_0 \ln \left( \frac{r_k}{r_0} \right)}{\int_{r_0}^{r_k} \frac{\mu(T)}{r} dr}. \quad (2)$$

Здесь  $Q_0$ ,  $r_0$  и  $r_k$  – первоначальный дебит, радиус и радиус контура питания скважины;  $\mu(T)$  – динамическая вязкость нефти, зависящая от температуры по закону:

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

где  $\gamma$  – температурный коэффициент,  $T_0$ ,  $T$  – начальная и текущая температура соответственно,  $\mu_0$  – вязкость нефти при температуре  $T_0$ .

Суммарные объемные источники тепла в среде, возникающие при воздействии ЭМ и акустического поля, можно представить в виде:

$$q_{aэ} = q_a + q_э, \quad (4)$$

где  $q_э$  определяется выражением [13]:

$$q_э = \frac{\alpha_э \beta_э N_{э0}}{\pi r_0 h} \frac{|H_0^{(2)}(k_э r)|^2}{\operatorname{Re}\{jk_э^* H_0^{(2)}(k_э r_0) H_1^{(2)*}(k_э^* r_0)\}}, \quad (5)$$

где  $k_э = \omega_э \sqrt{\tilde{\epsilon}_a \mu_0} = \beta_э - j\alpha_э$  – коэффициент распространения ЭМ волн в пласте;  $\omega_э = 2\pi f_э$  – частота ЭМ волн;  $\tilde{\epsilon}_a, \mu_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (комплексная величина), магнитная постоянная;  $\alpha_э$  и  $\beta_э$  – коэффициенты затухания и фазы ЭМ волн;  $j$  – мнимая единица;  $N_{э0}$  – мощность излучателя ЭМ волн;  $h$  – толщина пласта. Индекс «\*» означает комплексно-сопряженную величину;  $H_0^{(2)}(kr)$ ,  $H_1^{(2)}(kr)$  – функции Ханкеля;  $\operatorname{Re}$  – действительная часть комплексной величины.

Выражение распределенных источников тепла при акустическом воздействии на пласт  $q_a$  выведено использованием методики работы [14]. Получено следующее выражение:

$$q_a = \alpha_a N_{a0} \frac{\exp(-\alpha_a (r - r_0))}{2\pi r h}, \quad (6)$$

где  $\alpha_a$  и  $N_{a0}$  – коэффициент затухания и мощность излучателя акустических волн.

Зависимость коэффициента теплопроводности от интенсивности акустического поля принята линейной [2]:

$$\lambda_a = \begin{cases} \lambda_0 + AI(r), & I(r) \geq 840 \text{ Bm} / \text{m}^2 \\ \lambda_0, & I(r) < 840 \text{ Bm} / \text{m}^2 \end{cases} \quad (7)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности в отсутствии акустического поля;  $A$  – малый параметр, определяется экспериментально;  $I(r)$  – интенсивность акустического поля, определяемая по формуле:



$$I(r) = I_0 \frac{\exp(-\alpha_a(r-r_0))}{\sqrt{r/r_0}}; \quad (8)$$

$I_0$  – интенсивность излучателя акустических волн на стенке скважины.

**Краевые условия.** В начальный момент времени температура в пласте во всех точках одинакова:

$$T(r,0) = T_0. \quad (9)$$

Граничные условия на забое скважины и на радиусе контура питания имеют вид (считается, что граница пласта равна радиусу контура питания):

$$\left. \frac{\partial T(r_0, t)}{\partial r} \right|_{r_0 \rightarrow 0} = 0; \quad \frac{\partial T(r_k, t)}{\partial r} = 0. \quad (10)$$

### Решение задачи и анализ результатов

При вычислениях приняты следующие параметры среды:  $T_0 = 12$  °С;  $\lambda_0 = 1,28$  Вт/(м\*К);  $f_9 = 13,56$  МГц;  $\alpha_9 = 0,0194$  м<sup>-1</sup>;  $\beta_9 = 0,778$  м<sup>-1</sup>;  $f_a = 6, 16$  и  $22$  кГц;  $\alpha_a = 0,1298; 0,346$  и  $0,4758$  м<sup>-1</sup>;  $C_p = 1378000$  Дж/(м<sup>3</sup>\*К);  $\rho_f = 949$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_f = 1873$  Дж/(кг\*К);  $\mu_0 = 1,318$  Па\*с;  $\gamma = 0,064$  К<sup>-1</sup>;  $h = 8$  м;  $A = 0,000352$  м/К;  $r_0 = 0,05$  м;  $N_{a0} = 1,5$  и  $10$  кВт;  $N_{90} = 20$  и  $40$  кВт;  $Q_0 = 0,1, 0,5$  и  $1$  м<sup>3</sup>/сут.

При проведении расчётных исследований использовались и варьировались следующие параметры акустического поля:  $N_{a0} = 1,5$  кВт с частотами  $6$  кГц и  $16$  кГц [6] и  $N_{a0} = 10$  кВт с частотой  $22$  кГц [12]. По известной мощности генератора акустических волн  $N_{a0}$  интенсивность акустического поля  $I(r)$  определялась по формуле:  $I(r) = N_{a0}/(2\pi r h)$ . Расчёты проводились при учёте вязко-инерционного поглощения. В расчётах полагалось, что в порах твёрдой фазы нет. Для частот акустического поля  $6, 16$  и  $22$  кГц получились из выражений для кинетической и потенциальной энергий и уравнений Лагранжа для двух фаз пористой среды [15, 16] соответственно значения коэффициента затухания продольной волны 1-го рода  $\alpha_a = \delta_p = 0,1298; 0,346$  и  $0,4758$  м<sup>-1</sup>. Поперечными волнами в расчётах пренебрегалось из-за высоких значений

их коэффициентов затухания, в расчётах получилось:  $\delta_s = 1,936; 5,163$  и  $7,099 \text{ м}^{-1}$ . Коэффициент поглощения продольной волны 1-го рода в насыщенных жидкостью пористых средах намного меньше коэффициента поглощения продольной волны 2-го рода. Поэтому на значительные расстояния в таких средах распространяются в основном продольные волны 1-го рода [3]. Принято, таким образом, что коэффициент затухания продольной волны 1-го рода определяет коэффициент затухания акустических волн при проведении расчётов, т.е.  $\alpha_a = \delta_p$ .

Расчёты показали, что даже при небольшой мощности акустического генератора ( $N_{a0} = 1,5 \text{ кВт}$ ), тепловые источники, создаваемые им, привносят заметный вклад в суммарные тепловые источники вблизи скважины (рисунок 1). При большой же мощности акустического генератора ( $N_{a0} = 10 \text{ кВт}$ ), тепловые источники, создаваемые им, вносят основной вклад в суммарные тепловые источники вблизи скважины. Так что пренебрежение тепловыми источниками, создаваемыми акустическим полем, даёт заметные и даже очень большие искажения действительности в тепловом воздействии акустическим полем на продуктивный пласт.

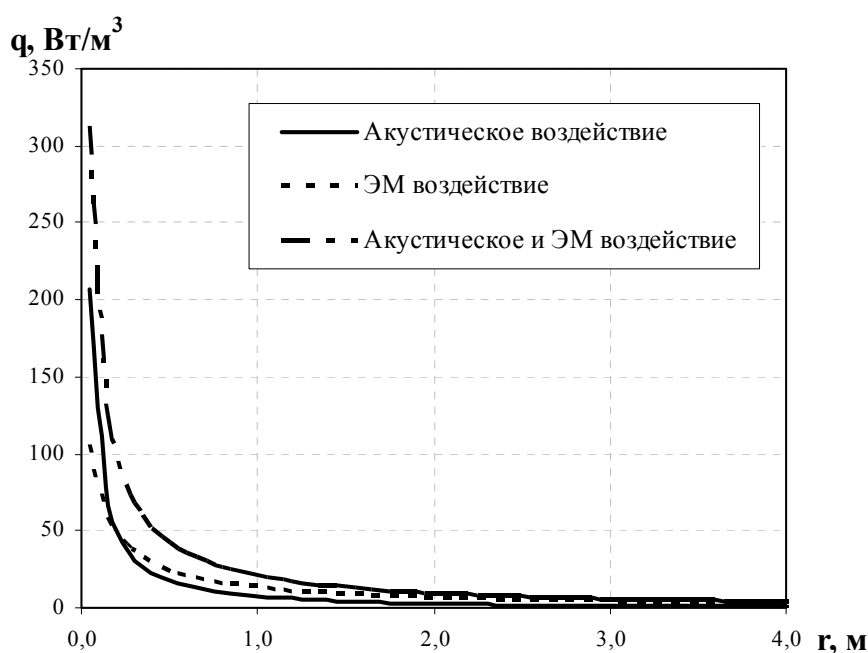


Рисунок. 1. Распределение тепловых источников в пласте:  
 $N_{\text{э0}} = 20 \text{ кВт}$ ;  $N_{a0} = 1,5 \text{ кВт}$ ;  $f_a = 16 \text{ кГц}$

В качестве ультразвукового излучателя используют гирлянду пьезокерамических преобразователей. Будем полагать, элементы гирлянды равномерно расположены по всей толщине пласта. В таком случае  $I_0$  – интенсивность излучателя на стенке скважины определяется выражением:

$$I_0(r_0) = \frac{N_{a0}}{2\pi r_0 h} \quad (11)$$

Из того, что существует минимальное значение интенсивности акустического поля  $I(r)$ , при котором наблюдается увеличение теплопроводности (согласно работы [2]  $I_{min}(r_0) = 840 \text{ Вт/м}^2$ ) следует, что существует и минимальное значение мощности излучателя акустических волн  $N_{a0min}$ , при котором возможно заметное увеличение теплопроводности в акустическом поле. По выражению (11) из минимального значения интенсивности акустического поля  $I_{min}(r_0)$  получается минимальное значение излучателя акустических волн:

$$N_{a0min} = I_{min}(r_0) 2\pi r_0 h \quad (12)$$

Для проведения оценочных вычислений использованы параметры среды  $r_0 = 0,05, 0,1 \text{ м}$ ;  $h = 4, 8 \text{ и } 12 \text{ м}$ . Подставляя эти значения радиуса скважины, толщины пласта и  $I_{min}(r_0) = 840 \text{ Вт/м}^2$  в (12), получаем:

1.  $r_0 = 0,05 \text{ м}$ ;  $h = 4 \text{ м}$  –  $N_{a0min} = 1,055 \text{ кВт}$ .
2.  $r_0 = 0,05 \text{ м}$ ;  $h = 8 \text{ м}$  –  $N_{a0min} = 2,11 \text{ кВт}$ .
3.  $r_0 = 0,05 \text{ м}$ ;  $h = 12 \text{ м}$  –  $N_{a0min} = 3,165 \text{ кВт}$ .
4.  $r_0 = 0,1 \text{ м}$ ;  $h = 4 \text{ м}$  –  $N_{a0min} = 2,11 \text{ кВт}$ .
5.  $r_0 = 0,1 \text{ м}$ ;  $h = 8 \text{ м}$  –  $N_{a0min} = 4,22 \text{ кВт}$ .
6.  $r_0 = 0,1 \text{ м}$ ;  $h = 12 \text{ м}$  –  $N_{a0min} = 6,33 \text{ кВт}$ .

То есть, полученные значения мощности генератора акустических волн для данных  $r_0$  и  $h$  – минимальные, при которых происходит увеличение теплопроводности пласта.

Распределения температуры в пласте в различные моменты времени при  $f_a = 22 \text{ кГц}$ ;  $h = 8 \text{ м}$ ;  $r_0 = 0,05 \text{ м}$ ;  $N_{a0} = 10 \text{ кВт}$ ;  $N_{\text{э}0} = 40 \text{ кВт}$ ;  $Q_0 = 0,5$  и

1 м<sup>3</sup>/сут. представлены на рисунках 2–3. Как видно из полученных рисунков, с увеличением расхода добываемой нефти температура нагрева пласта уменьшается, т.к. вместе с добываемой нефтью уносится и тепло, выделенное поглощаемой энергией ЭМ и акустических волн. Десятикратное увеличение первоначального дебита скважины приводит к уменьшению температуры только в 1,5 раза. Это следствие объёмного, а не контактного нагрева среды.

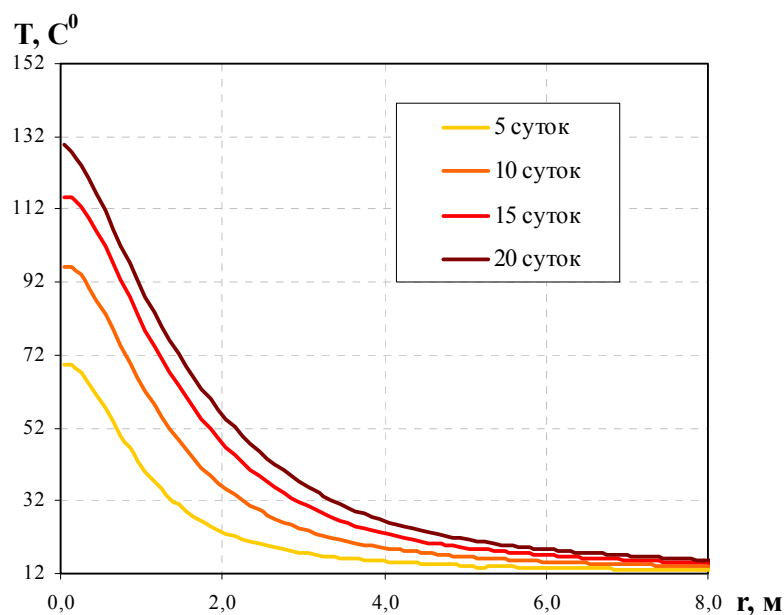


Рисунок 2. Распределение температуры в пласте:  
 $N_{\text{э}0} = 40 \text{ кВт}$ ;  $N_{\text{а}0} = 10 \text{ кВт}$ ;  $Q_0 = 0,1 \text{ м}^3/\text{сут.}$

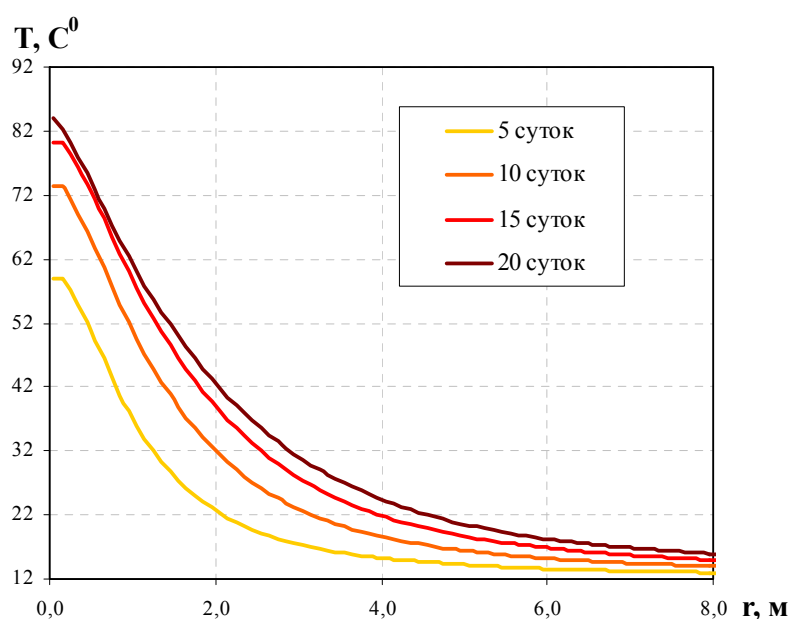


Рисунок 3. Распределение температуры в пласте:  
 $N_{\text{э}0} = 40 \text{ кВт}$ ;  $N_{\text{а}0} = 10 \text{ кВт}$ ;  $Q_0 = 1 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Динамика изменения температуры на забое скважины и роста дебита скважины показаны на рисунках 4 и 5. Из рисунков следует, что с ростом первоначального дебита скважины увеличение температуры на забое скважины и текущего дебита скважины замедляются. Чем больше первоначальный дебит скважины, тем больше накопленный дебит скважины, но меньше относительное увеличение дебита скважины (таблица 1).

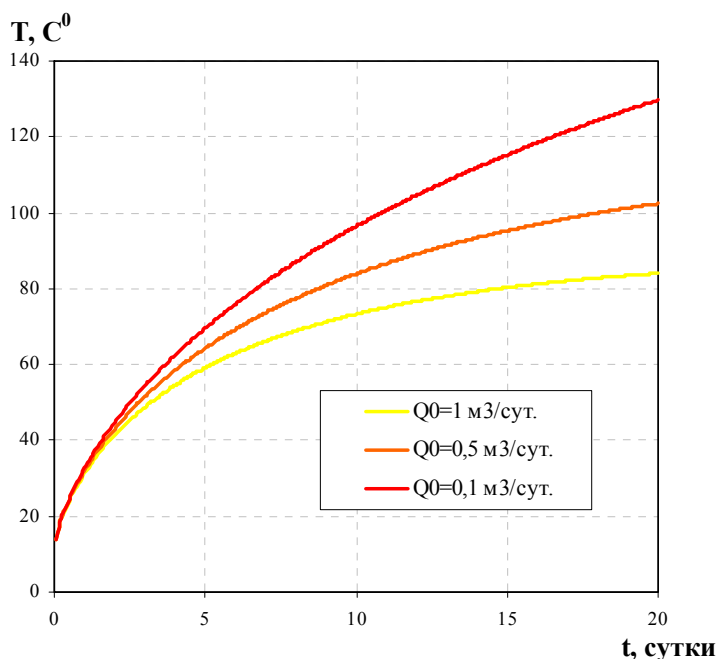


Рисунок 4. Динамика изменения температуры на забое скважины:  
 $N_{э0} = 40$  кВт;  $N_{a0} = 10$  кВт

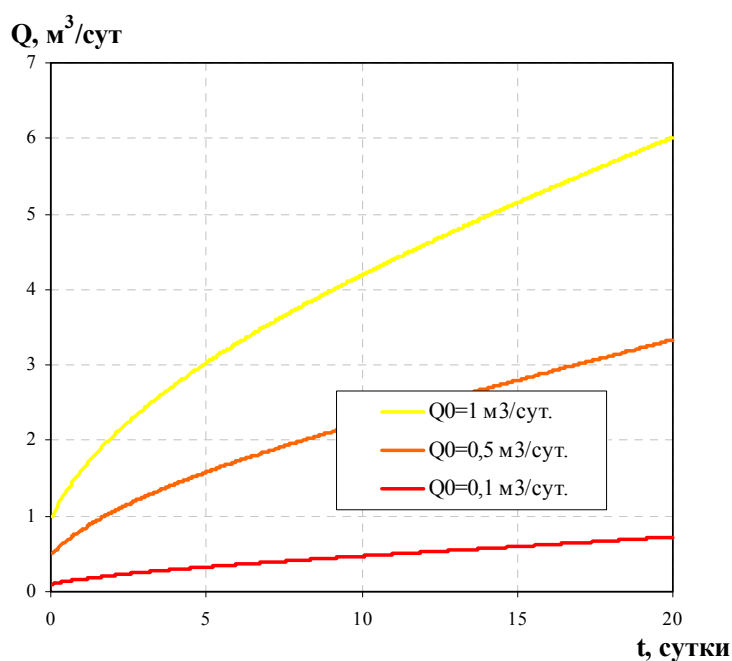


Рисунок 5. Динамика роста дебита скважины:  $N_{э0} = 40$  кВт;  $N_{a0} = 10$  кВт

Из таблицы 1 следует, что чем больше первоначальный дебит скважины, тем эффективнее совместное воздействие ЭМ и акустического полей на нефтяной пласт. Так, при десятикратном увеличении первоначального дебита скважины произойдет значительный прирост абсолютного накопленного дебита скважины при незначительном уменьшении относительного дебита скважины. Это опять же следствие объёмного нагрева среды.

Таблица 1. Изменение дебита скважины после совместного ВЧ электромагнитного и акустического воздействия

Первоначальный дебит скважины, м <sup>3</sup> /сут.	Накопленный дебит, м <sup>3</sup> /сут.	Относительное увеличение дебита скважины
$Q_0 = 0,1$	0,627	7,27 раз
$Q_0 = 0,5$	2,83	6,66 раз
$Q_0 = 1$	5,02	6,02 раз

## Выводы

1. Сформулированная математическая модель и ее численная реализация показали, что взаимодействие интенсивных ВЧ ЭМ и акустических полей в насыщенной пористой среде может проявляться в специфическом термоакустическом воздействии, когда тепловое поле создается в среде за счет поглощения энергии ЭМ и акустического полей, появления распределённых источников тепла и интенсивного переноса тепла вглубь среды. Поэтому важной особенностью ВЧ электромагнитно-акустического воздействия является существенное увеличение темпа прогрева пласта и радиуса воздействия по сравнению с термоакустическим воздействием.

2. Установлено, что существует минимальное значение излучателя акустических волн  $N_{aomin}$ , при котором возможно заметное увеличение теплопроводности в акустическом поле. Эффективность акустического воздействия на пласт существенно зависит от радиуса скважины и толщины пласта, чем меньше они, тем лучше.

3. С увеличением дебита скважины темп нагрева пласта уменьшается, т.к. вместе с добываемой нефтью уносится и тепло, выделенное поглощаемой энергией ЭМ и акустических волн. Чем больше первоначальный дебит скважины, тем больше накопленный дебит скважины и эффективнее совместное воздействие ЭМ и акустического полей на нефтяной пласт.

## References

1 Sayhov F.L. Investigation of thermal and hydrodynamic processes in multiphase flow in the high-frequency electromagnetic field is applied to the oil industry: dissertation of the doctor of phys. and math. sci. M., 1985. P. 449. [in Russian].

2 Vahitov G.G., Kuznecov O.L., Simkin E.M. Thermodynamics bottom zone of the oil reservoir. M.: Nedra, 1978. P. 216. [in Russian].

3 Surguchev M.L., Kuznecov O.L., Simkin E.M. Hydrodynamic, acoustic, thermal cycling effects on oil reservoirs. M.: Nedra, 1975. P. 184. [in Russian].

4 Kuznecov O.L., Sergeev L.A., Simkin E.M. The emergence of convective heat transfer under the influence of the sound field in saturated sands// Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1968. № 3. P. 150-152. [in Russian].

5 Simkin E.M., Kuznecov O.L., Filatova E.E. Experimental study of the heat conductivity of saturated media under the influence of an acoustic field of varying intensity// JEPTER. 1973. Vol. 24. №4. P. 639-942. [in Russian].

6 Sayhov F.L., Dyblenko V.P., Tufanov I.A. Study of electromagnetic-acoustic effects on saturated porous medium// JEPTER. 1979. Vol. 36. №1. P. 649-952. [in Russian].

7 Gadiev S.M. Using vibration in oil production. M.: Nedra, 1977. P. 197. [in Russian].

8 Ganiev R.F. Oscillatory motion in multiphase media, and their use in the art. Kiev: Naukova Dumka, 1980. P. 276. [in Russian].

9 Kogan Ya.M. About physicochemical foundations prevention education resin-paraffin deposits using fields generated electric shock / In the book: Paraffin control. Moscow: Nedra, 1965. P. 170-181. [in Russian].

10 The laboratory and field tests of the influence of an alternating electromagnetic field on the formation of resin-paraffin deposits / Kogan Ya.M. and etc. In the book: Paraffin control. Moscow: Nedra, 1965. P. 182-191. [in Russian]

11 Electrophysics petroleum systems / Sayhov F.L and etc.: Textbook. Ufa: RIO BSU 2003. 190 p. [in Russian].

12 Kuznecov O.L., Efimova S.A. The use of ultrasound in the oil industry. Moscow: Nedra, 1983. P. 192. [in Russian].

13 Nasyrov N.M., Kovaleva L.A. Using numerical methods for solving high-frequency electromagnetic hydrodynamics: Textbook. Ufa: RIO BSU, 2007. 153 p. [in Russian].

14 Abernethy E. R. Production increase of heavy oils by Electromagnetic heating // J. Can. Petrol. Technol. 1976. V. 15, № 3. P. 91-97. [in English].

15 Lyahovickii F.M., Rapoport L.I. Application of the theory of Frenkel-Bio to calculate the velocity and absorption of elastic waves in saturated porous media // Applied Geophysics. 1972. Is. 55. P. 52-64. [in Russian].

16 Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated Porous Solid // J. Acoust. Soc. Amer. 1956. V. 28, №2. P. 179-191. [in English].

### **Список используемых источников**

1 Саяхов Ф.Л. Исследование термо- и гидродинамических процессов в многофазных средах в высокочастотном электромагнитном поле применительно к нефтедобыче: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1985. 449 с.

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



3 Сургучев М.Л., Кузнецов О.Л., Симкин Э.М. Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклическое воздействия на нефтяные пласты. М.: Недра, 1975. 184 с.

4 Кузнецов О.Л., Сергеев Л.А., Симкин Э.М. Возникновение конвективной теплопередачи под действием звукового поля в насыщенных песках // Журнал прикладной механики и технической физики. 1968. №3. С. 150-152.

5 Симкин Э.М., Кузнецов О.Л., Филатова Е.Е. Экспериментальное исследование теплопроводности насыщенных сред при воздействии акустическим полем различной интенсивности // ИФЖ. 1973. Т. 24. №4. С. 639-642.

6 Саяхов Ф.Л., Дыбленко В.П., Туфанов И.А. Исследование электромагнитно-акустического воздействия на насыщенную пористую среду // ИФЖ. 1979. Т. 36. № 1. С. 649-652.

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

8 Ганиев Р.Ф. Колебательные движения в многофазных средах и их использование в технологии. Киев: Наукова думка, 1980. 276 с.

9 Коган Я.М. О физико-химических основах предупреждения образования смоло-парафиновых отложений с помощью полей, создаваемых электрическим током. В кн.: Борьба с отложениями парафина. М.: Недра, 1965. С. 170-181.

10 Лабораторные исследования и промысловые испытания влияния переменного электромагнитного поля на образование смоло-парафиновых отложений / Коган Я.М. и др. В кн.: Борьба с отложениями парафина. М.: Недра, 1965. С. 182-191.

11 Электрофизика нефтегазовых систем / Саяхов Ф.Л. и др.: Учеб. пособие. Уфа: РИО БашГУ, 2003. 190 с.

12 Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983. 192 с.

13 Насыров Н.М., Ковалева Л.А. Использование численных методов при решении задач высокочастотной электромагнитной гидродинамики: Учеб. пособие. Уфа: РИО БашГУ, 2007. 153 с.

14 Abernethy E. R. Production increase of heavy oils by Electromagnetic heating // J. Can. Petrol. Technol. 1976. V. 15, № 3. P. 91-97.

15 Ляховицкий Ф.М., Рапопорт Л.И. Применение теории Френкеля-Био для расчета скоростей и поглощения упругих волн в насыщенных пористых средах // Прикладная геофизика. 1972. Вып. 55. С. 52-64.

16 Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated Porous Solid // J. Acoust. Soc. Amer. 1956. V. 28, №2. P. 179-191.

### **About the authors**

#### **Сведения об авторах**

G.R. Izmaylova, Teacher of Chair Information Technology, Mathematics and Science, FSBEI NPE USPTU, Branch, Oktyabrsky, the Russian Federation

Измайлова Г.Р., преподаватель кафедры информационных технологий, математики и естественных наук, ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал г. Октябрьский, Российская Федерация

e-mail: gulena-86@mail.ru

L.A. Kovaleva, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Applied Physics Chair of Bashkir State University, Ufa, the Russian Federation

Ковалева Л.А., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВПО БашГУ, г. Уфа, Российская Федерация

N.M. Nasyrov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Applied Physics Chair of Bashkir State University, Ufa, the Russian Federation

Насыров Н.М., канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной физики, ФГБОУ ВПО БашГУ, г. Уфа, Российская Федерация