

© Г.И.Джалалов, Е.В.Горшкова, З.Б.Кулиева, М.Г.Ханбабаева, 2015

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДЕФОРМИРУЕМОМ ПЛАСТЕ ПРИ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОМ РЕЖИМЕ ФИЛЬТРАЦИИ НЕФТИ**Г.И.Джалалов, Е.В.Горшкова, З.Б.Кулиева, М.Г.Ханбабаева***Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 119*

В статье дается определение поля температуры с учетом эффекта Джоуля-Томсона при установившейся фильтрации нефти к центральной скважине в деформируемом круговом пласте в зависимости от изменения проницаемости вследствие деформации породы. На основании проведенных многочисленных экспериментов построена приближенная математическая модель тепломассопереноса в деформируемом пласте при нелинейно-упругом режиме фильтрации, позволяющая исследовать температурную аномалию на выходе из скважины в зависимости от различных геометрических и физических параметров системы.

Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что залежи углеводородов характеризуются широким разнообразием термодинамических и реологических условий. Научно обоснованное управление процессами разработки немыслимо без учета взаимосвязи термодинамических и гидродинамических явлений в пласте и скважине, а также особенностей каждого конкретного месторождения. Этому направлению посвящено достаточное количество работ. Подробный обзорный анализ приведен в работах (Абасов и др., 1993; Алишаев и др., 1985; Вахитов и др., 1984; Карачинский, 1975; Рамазанов, 2004; Филиппов, Ахметова, 2011).

При разработке глубокозалегающих месторождений, характеризующихся высокими пластовыми давлениями и температурами, скелет породы продуктивного коллектора подвергается значительным нагрузкам при снижении пластового давления, так как горное давление остаётся неизменным, а эффективное давление растёт. В результате происходят изменения деформационных процессов в пористой среде, сопровождающиеся снижением её пористости и проницаемости. Это оказывает влияние на фильтрацию пластовых флюидов и основные показатели разработки месторождения (Горбунов, 1981; Горшкова, 2009 и др.).

Термодинамические эффекты упругих деформаций твердого скелета при фильтрации жидкостей в более точной постановке рассмотрены П.П.Золотаревым и В.Н. Николаевским (1966). В этой работе основное внимание уделяется оценке влияния тепловых эффектов на процессы деформирования рассматриваемых сред. При этом показано, что ощутимый тепловой

эффект упругих деформаций скелета породы при фильтрации жидкостей проявляется в случаях, когда $\alpha_s \ll \alpha_f$ (где α_s, α_f – термодинамические коэффициенты расширяемости твердого скелета).

При рассмотрении процесса фильтрации жидкости в глубокозалегающих коллекторах необходимо учитывать не только упругие свойства коллектора, но и предусмотреть возможность появления необратимых деформаций и их влияние на коллекторские свойства пласта (Горбунов, 1981; Горшкова, 2009; Джалалов, Горшкова, 2013).

Анализ многочисленных опытных данных показал, что кривые зависимостей проницаемости и пористости от пластовых давлений при деформациях коллектора с большей степенью точности описываются экспоненциальными зависимостями (Горбунов, 1981; Горшкова, 2009):

$$\begin{aligned}\bar{k}(p) &= e\alpha p[-\beta_k(p_o - p)], \\ \bar{m}(p) &= e\alpha p[-\beta_m(p_o - p)].\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь $\bar{k}(p) = \frac{k(p)}{k_0}$, $\bar{m}(p) = \frac{m(p)}{m_0}$, k_0, m_0 – соответственно значения проницаемости и пористости пласта при начальном пластовом давлении P_k ; β_k, β_m – соответственно параметры, определяемые экспериментально, характеризующие изменение проницаемости и пористости пласта в зависимости от давления.

В статье дается определение поля температуры с учетом эффекта Джоуля-Томсона при установившейся фильтрации нефти к централь-

ной скважине с радиусом R_c в однородном деформируемом круговом пласте в зависимости от изменения проницаемости вследствие деформации породы.

На контуре пласта поддерживается постоянное давление. Фильтрация жидкости подчиняется линейному закону Дарси. Режим пласта – водонапорный.

Уравнение для определения полей давления в деформируемом пласте имеет вид (Горбунов, 1981; Джалалов, Горшкова, 2013):

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[\frac{rk_0 \bar{k}(p) \rho}{\mu} \frac{dp}{dr} \right] = 0, \quad (2)$$

где p – давление;

$\bar{k}(p)$ – изменение проницаемости, вызванное деформацией пласта;

k_0, ρ, μ – соответственно проницаемость пласта, плотность и вязкость нефти при начальном пластовом давлении.

Для расчета температурного поля пласта с учетом эффекта Джоуля-Томсона воспользуемся уравнением притока тепла (Золотарев, Николаевский, 1966; Карачинский, 1975; Чекалюк, 1965 и др.):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon V \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

где

$$V = - \frac{C_{ж} \rho}{C_{ноп}} \frac{k(p)}{\mu} \frac{dp}{dr};$$

T – температура;

$\rho C_{ж}$ – удельная теплоемкость жидкости;

$C_{ноп} = C_m + m p C_{ж}$ – удельная теплоемкость породы

C_m – теплоемкость твердой фазы;

ε – коэффициент Джоуля-Томсона.

Система уравнений (2) и (3) решается при следующих начальных и граничных условиях:

$$p|_{r=R_c} = p_c, \quad p|_{r=R_k} = p_k, \quad (4)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad T|_{r=R_k} = T_o, \quad (5)$$

где p_c и p_k – соответственно значения давления на скважине и контуре питания пласта;

T_0 – начальное значение температуры пласта.

Решение уравнения (2) с учетом (1) при условиях (4) имеет вид (Горбунов, 1981):

$$P(r) = P_k + \frac{1}{\beta_k} \ln \left[1 + \frac{1 - e^{(-\beta_k \Delta p_c)}}{\ln \frac{R_k}{R_c}} \ln \frac{r}{R_k} \right], \quad (6)$$

где $\Delta p_c = p_k - p_c$.

С учетом (6) дифференциальное уравнение (3) после несложных преобразований приводим к виду:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\xi}{r} \frac{\partial T}{\partial r} - \Psi \frac{1}{r^2 \left(1 - \delta \ln \frac{r}{R_k} \right)} = 0, \quad (7)$$

$$\text{где } \delta = \frac{e^{-\beta_k \Delta p_c} - 1}{\ln \frac{R_k}{R_c}}, \quad \xi = \frac{C_{ж} \rho k_0 \delta}{C_{ноп} \mu \beta_k}, \quad \Psi = \frac{\varepsilon \delta \xi}{\beta_k}.$$

Применяя к (5) и (7) преобразование Лапласа

$$T_s(r, s) = \int_0^\infty e^{-st} T(r, t) dt, \quad (8)$$

получим для распределения изображения температуры следующее выражение:

$$T_s(r, s) = \frac{T_0}{s} + \frac{\Psi}{s \xi} e^{-\frac{sr^2}{2\xi} \frac{R_k}{r}} \int_r^{\frac{sr^2}{2\xi} \frac{R_k}{r}} \frac{e^{-\frac{sr^2}{2\xi}}}{r \left(1 - \delta \ln \frac{r}{R_k} \right)} dr, \quad (9)$$

где s – параметр преобразования Лапласа.

Переход от функции изображения $T_s(r, s)$ из (9) к оригиналу связан со значительными математическими расчетами. В связи с этим повсеместно наиболее распространенным методом решения таких задач стало использование преобразования Лапласа с последующим приближенным переходом к оригиналу.

Одним из наиболее простых методов приближенного перехода изображения к оригиналу является метод Shapery, в котором формула обращения представляется в виде (Shapery, 1963):

$$T(r, t) = s T_s(r, s) \Big|_{s=\frac{1}{2t}}. \quad (10)$$

Тогда из (8) имеем:

$$T(r,t) = T_0 + \frac{\varepsilon \delta}{\beta_k} e^{-\frac{R_c^2}{4\zeta t}} \int_r^{\frac{R_k}{R_c}} \frac{e^{-\frac{r^2}{4\zeta t}}}{r \left(1 - \delta \ln \frac{r}{R_k}\right)} \frac{dr}{r}. \quad (11)$$

При режиме постоянного отбора жидкости, заменяя условие (4) на скважине условием

$$\frac{2\pi k_0 \bar{k}(p) h \rho}{\mu} r \frac{dp}{dr} \Big|_{r=R_c} = Q, \quad (12)$$

для распределения полей давления и температуры соответственно будем иметь:

$$P(r) = P_k + \frac{1}{\beta_k} \ln \left[1 + \frac{Q \mu \beta_k}{2\pi k_0 h \rho} \ln \frac{r}{R_k} \right], \quad (13)$$

$$T(r,t) = T_0 + \frac{Q \mu \varepsilon}{2\pi k_0 h \rho} e^{-\frac{R_c^2}{4\zeta t}} \int_r^{\frac{R_k}{R_c}} \frac{e^{-\frac{r^2}{4\zeta t}}}{r \left(1 + \gamma \ln \frac{r}{R_k}\right)} \frac{dr}{r}, \quad (14)$$

$$\text{где } \nu = \frac{Q C_{жс}}{2\pi h C_{нор}}; \quad \gamma = \frac{Q \mu \beta_k}{2\pi k_0 h \rho}.$$

С целью количественной оценки влияния геометрических и физических параметров пласта на формирование температурных аномалий по формулам (10) и (13) проведены многочисленные расчеты для различных вариантов исходных данных.

Некоторые результаты этих расчетов приведены в виде графиков.

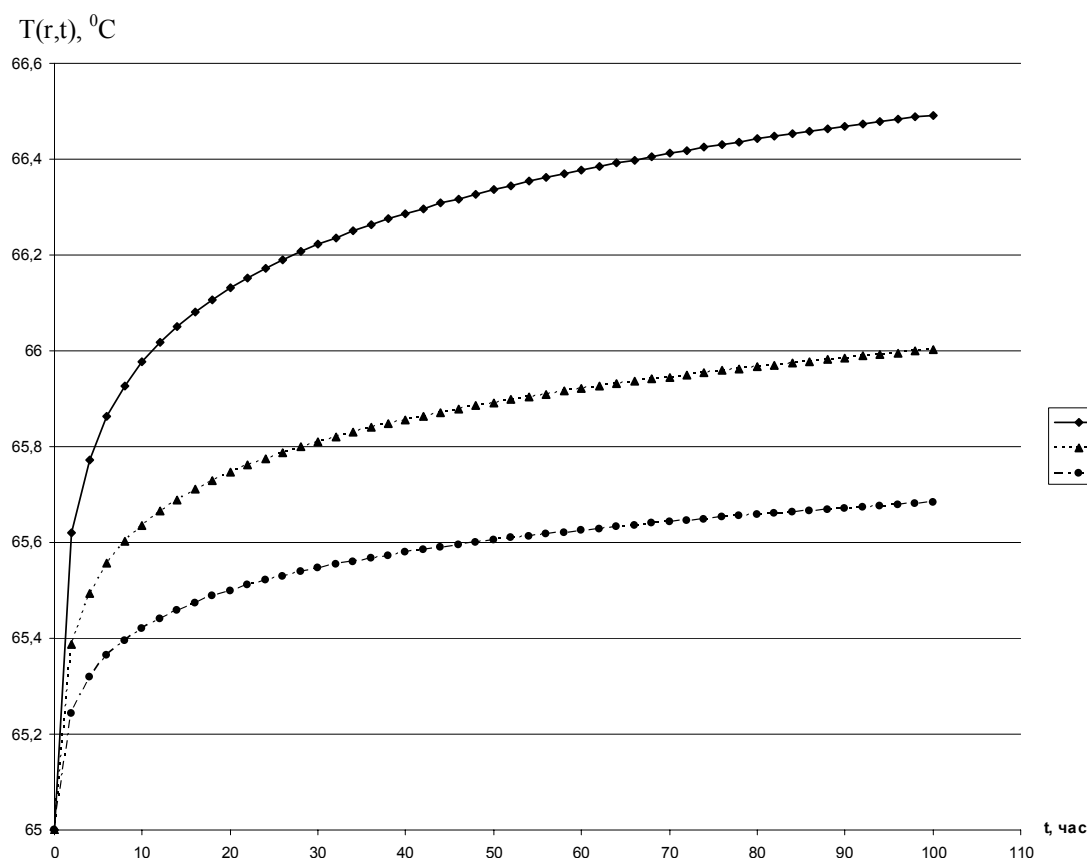


Рис. 1. Изменение температуры на выходе из пласта со временем в зависимости от перепада давления при $R_c = 0,2$ м; $h = 10$ м; $k_0 = 0,1 \cdot 10^{-12}$ м²; $T_0 = 65^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-7}$; $\mu = 0,005$ Па·сек.; $\beta_k = 0,3 \cdot 10^{-8}$ 1/Па; $R_k = 1000$ м; шифр кривых: 1. $\Delta P_c = 10^7$ Па; 2. $\Delta P_c = 7 \cdot 10^6$ Па; 3. $\Delta P_c = 5 \cdot 10^6$ Па

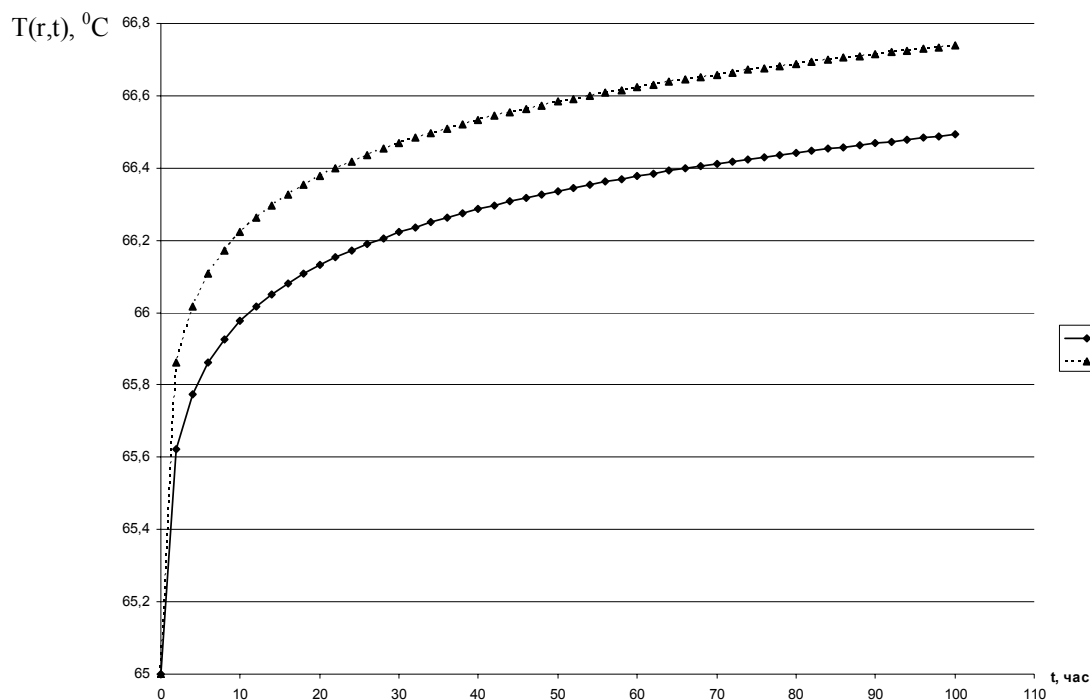


Рис. 2. Изменение температуры на выходе из пласта со временем в зависимости от проницаемости пласта при $R_c = 0,2$ м; $h = 10$ м; $T_0 = 65^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-7}$; $\mu = 0,005$ Па·сек.; $\beta_k = 0,3 \cdot 10^{-8}$ 1/Па; $R_k = 1000$ м; $\Delta P_c = 10^7$ Па; шифр кривых: 1. $k_0 = 0,1 \cdot 10^{-12}$ м²; 2. $k_0 = 0,3 \cdot 10^{-12}$ м²

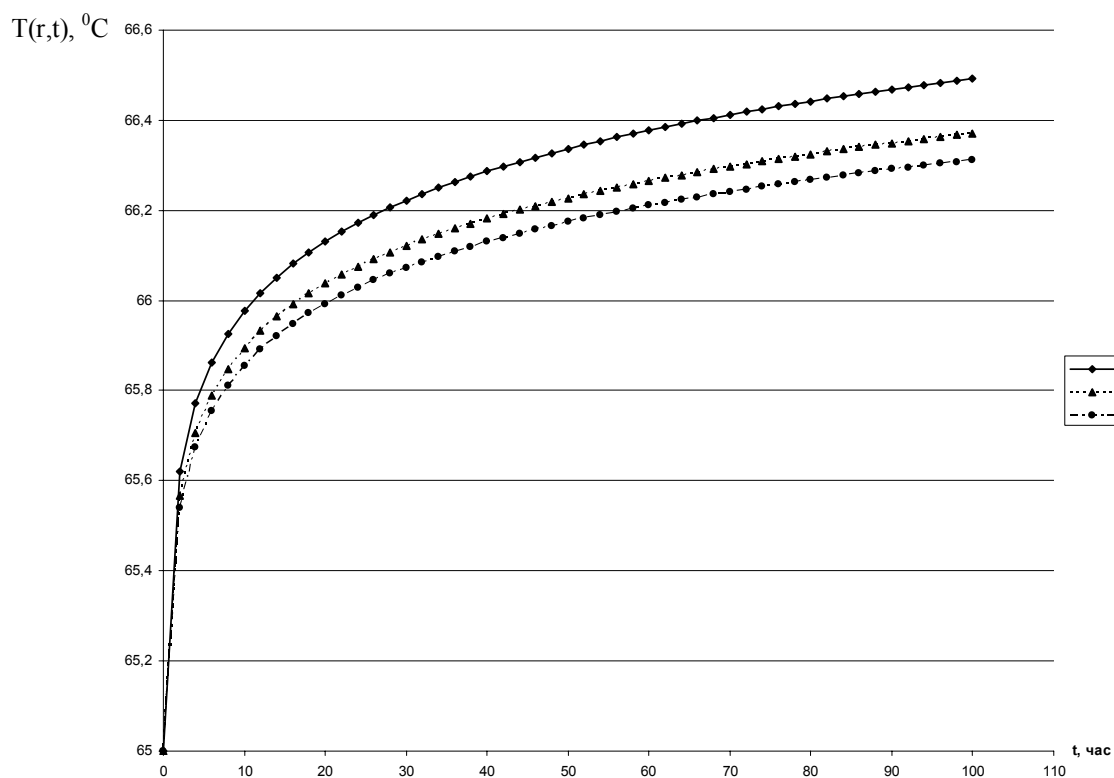


Рис. 3. Изменение температуры на выходе из пласта со временем в зависимости от радиуса контура питания при $R_c = 0,2$ м; $h = 10$ м; $k_0 = 0,1 \cdot 10^{-12}$ м²; $T_0 = 65^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-7}$; $\mu = 0,005$ Па·сек.; $\beta_k = 0,3 \cdot 10^{-8}$ 1/Па; $\Delta P_c = 10^7$ Па; шифр кривых: 1. $R_k = 1000$ м; 2. $R_k = 2000$ м; 3. $R_k = 3000$ м

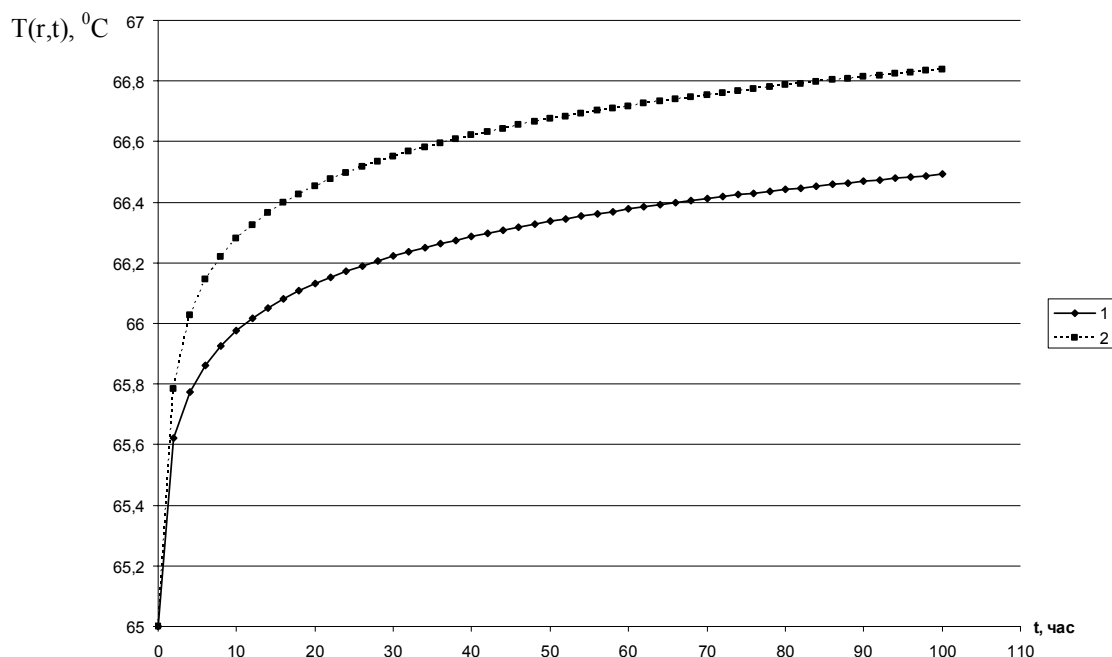


Рис. 4. Изменение температуры на выходе из пласта со временем в зависимости от параметра β_k при $R_c = 0,2$ м; $h = 10$ м; $k_0 = 0,1 \cdot 10^{-12}$ м²; $T_0 = 65^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-7}$; $\mu = 0,005$ Па·сек.; $R_k = 1000$ м; $\Delta P_c = 10^7$ Па; шифр кривых: 1. $\beta_k = 0,3 \cdot 10^{-8}$ 1/Па; 2. $\beta_k = 0$

Во всех рассмотренных вариантах скорость изменения температуры на выходе из пласта со временем уменьшается.

Из рис. 1 видно, что величина температурной аномалии со временем возрастает, причем тем больше, чем больше перепад давления.

Такие же закономерности наблюдаются соответственно в случаях увеличения значения коэффициента проницаемости пласта и радиуса контура питания (рис.2 и 3). При нелинейно-упругом режиме фильтрации однородной жидкости деформируемость породы в процессе разработки незначительно влияет на формирование температурной аномалии пласта и в процентных отношениях составляет всего 0,5% (рис.4). Этот результат полностью согласуется с результатами, полученными в работах (Джалалов, Горшкова, 2013; Золотарев, Николаевский, 1966).

Таким образом, предложена приближенная математическая модель тепломассопереноса в деформируемом пласте при нелинейно-упругом режиме фильтрации нефти, позволяющая исследовать температурную аномалию на выходе из скважины в зависимости от различных геометрических и физических параметров системы.

Следует отметить, что проведенные чис-

ленные эксперименты показали различное влияние входных параметров модели на рассчитываемую величину изменения температуры в пласте в различные периоды времени, что необходимо учитывать при решении обратных задач термометрии.

ЛИТЕРАТУРА

- АБАСОВ, М.Т., АЗИМОВ, Э.Х., КУЛИЕВ, А.М. 1993. Гидротермодинамические исследования скважин глубокозалегающих месторождений. Азербайджанское Государственное Издательство. Баку. 176 с.
- АЛИШАЕВ, М.Г., РОЗЕНБЕРГ, М.Д., ТЕСЛЮК, Е.В. 1985. Неизотермическая фильтрация при разработке нефтяных месторождений. Москва. Недра. 271 с.
- ВАХИТОВ, Г.Г., ГАТТЕНБЕРГЕР, Ю.П., ЛУТКОВ, В.А. 1984. Геотермические методы контроля за разработкой нефтяных месторождений. Москва. Недра. 240 с.
- ГОРБУНОВ, А.Т. 1981. Разработка аномальных нефтяных месторождений. Москва. Недра. 240 с.
- ГОРШКОВА, Е.В. 2009. Экспериментальные исследования влияния эффективного давления и температуры на свойства пород природных резервуаров. Диссертация на соискание ученой степени доктора философии геолого-минералогических наук. Баку. 160 с.
- ДЖАЛАЛОВ, Г.И., ГОРШКОВА, Е.В. 2013. Влияние неизотермичности процесса фильтрации жидкости в пласте с деформируемым коллектором на продуктивность скважины. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*, 9, 27-31.
- ЗОЛОТАРЕВ, П.П., НИКОЛАЕВСКИЙ, В.Н. 1966. Термо-

- динамический анализ нестационарных процессов в насыщенных жидкостью и газом деформируемых пористых средах. В ежегоднике: *Теория и практика добычи нефти*. Москва. Недра. 49-61.
- КАРАЧИНСКИЙ, В.Е. 1975. Методы геотермодинамики залежей газа и нефти. Москва. Недра. 168 с.
- РАМАЗАНОВ, А.Ш. 2004. Теоретические основы термодинамических методов исследования нефтяных пластов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Уфа. 269 с.
- ФИЛИППОВ, А.И., АХМЕТОВА, О.В. 2011. Температурное поле в пласте и скважине. Гилем. Уфа. 329 с.
- ЧЕКАЛЮК, Э.Б. 1965. Термодинамика нефтяного пласта. Москва. Недра. 238 с.
- SHAPERY, R.A. 1963. An approximate method of stress analysis for a large class problems in viscosity. Purdue Univ. Pert Anad ES.

Рецензент: член-корреспондент НАН Азербайджана Г.М.Панахов