

УДК 550.832.6

UDC 550.832.6

05.00.00 Технические науки

Engineering

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННО-ВОЛНОВОГО НАГРЕВА НЕФТЯНОГО ПЛАСТА**FILTRATION-WAVE HEATING OF THE OIL POOL**

Коньс Еркинат Магзомович
Студент 3-го курса,
erkanat_1996@mail.ru

Konys Yerkanat Magzomovich
Student of the 3rd course,
erkanat_1996@mail.ru

Кульчубаев Нурислам Булатович
Студент 3-го курса

Kulchubayev Nurislam Bulatovich
Student of the 3rd course

Шантиев Едиге Исмагулович
Студент 3-го курса,

Shantiev Yedige Ismagulovich
Student of the 3rd course

Хисматуллин Азат Салаватович
к.ф.-м.н., доцент
*Филиал «Уфимский государственный нефтяной
технический университет» в г. Салавате, 453250,
Россия, Республика Башкортостан, г. Салават, ул.
Губкина, д. 22Б.*

Hismatullin Azat Salavatovich
Cand.Fiz-Mat.Sci., associate professor
*Branch of "Ufa state petroleum technological Univer-
sity" in the city of Salavat, 453250, Russia, Bashkorto-
stan Republic, Salavat, St. Gubkin, D. 22B.*

В данной статье разработана математическая модель термодинамических процессов при колебательном движении жидкостей в пористой среде с учетом теплового взаимодействия нефтяного пласта с окружающими породами и фазовых переходов вследствие растворения парафинов; разработка программного средства на языке высокого уровня и проведение вычислительного эксперимента, обосновывающие возможность увеличения нефтеотдачи пластов при воздействии на них периодическими полями давления. Предложено использование баротермического эффекта для увеличения температуры удаленных от скважины зон пласта. Математическая модель базируется на уравнении теплового баланса, учитывающего вклад фазовых переходов за счет парафинизации в случае, когда движение смеси происходит в однородной пористой изотропной среде с постоянной пористостью и постоянной плотностью. В работе развита теория баротермического эффекта при колебательном движении жидкостей в пористой среде с учетом теплового взаимодействия нефтяного пласта с окружающими породами и фазовых переходов вследствие растворения парафинов. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных подтвердило возможность использования первого приближения для расчетов реальных термодинамических процессов в фильтрационно-волновых полях. Разработанная модель процесса позволяет рассчитывать температурные поля в практических условиях

We have developed a mathematical model of thermodynamic processes at oscillatory movement of liquids in porous environment with consideration of heat interaction of an oil layer with surrounding breeds and phase transitions caused by dissolution of paraffin's dissolution. We have received analytical dependences of temperatures on time, distances to well and depth, that proves an opportunity to increase of oil recovery when influenced by periodic fields of pressure. We have suggested a bartering effect to increase the temperature in zones far from the well formation. The mathematical model is based on the equation of heat balance, taking into account the contribution of phase transitions due to paraffinization in the case when the motion of the mixture takes place in a homogeneous isotropic porous medium with constant porosity and constant density. In the work we have developed a theory of bartering effect upon oscillatory movement of fluids in porous media considering thermal interaction between the oil reservoir and surrounding rocks and phase transitions due to the dissolution of paraffins. Comparison of theoretical and experimental data has confirmed the possibility of using the first approximation for the calculation of real thermodynamic processes in the filtration-wave fields. The developed process model allows the calculation of the temperature field in the practical conditions

Ключевые слова: ПАРАФИНИЗАЦИЯ, ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТ, ПАРАФИНИСТАЯ НЕФТЬ, АСИМПТОМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Keywords: WAXING, THERMAL EFFECT, PARAFFIN OIL, ASYMPTOTIC METHOD

Doi: 10.21515/1990-4665-128-095

В работах [1-9] предложено использование баротермического эффекта для увеличения температуры удаленных от скважины зон пласта с использованием программного средства на языке высокого уровня. Дело в том, что поля давления в нефтеносных пластах при наличии фильтрационно-волновых процессов нестационарны, поэтому фильтрация нефти в пластах приводит к появлению баротермического эффекта – изменению температуры при течении флюида в пористой среде в нестационарном поле давления. Величина баротермического эффекта зависит от свойств пористой среды, фильтрующейся жидкости, времени, геометрии течения и т.д. Одной из наиболее важных особенностей баротермического эффекта является возрастание температуры со временем в фильтрационно-волновых полях.

Математическая модель базируется на уравнении теплового баланса, учитывающего вклад фазовых переходов за счет парафинизации в случае, когда движение смеси происходит в однородной пористой изотропной среде с постоянной пористостью $m=\text{const}$ и постоянной плотностью $\rho=\text{const}$:

$$\left[1 + \frac{ms}{c_n} f_1(T)\right] \frac{\partial T}{\partial t} + u_{ef}(r,t) \left[1 + \frac{f_1(T)}{c_p \rho}\right] \frac{\partial T}{\partial r} + u_{ef}(r,t) \cdot \varepsilon_{ef} \frac{\partial P}{\partial r} - \eta_{ef} m \frac{c_{ж}}{c_n} \frac{\partial P}{\partial t} = a_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где

$$U_{ef}(r,t) = -\frac{c_m}{c_n} \frac{k}{\mu} \frac{P_0}{l} \frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{c_m}{c_n} \frac{k}{\mu} \frac{P_0}{r} \sin \omega t. \quad (2)$$

$$f_1(T) = L_1 \frac{\partial p}{\partial T} = C \left(\frac{T - T_H}{T_m - T_H} \right)^2 \exp \left(-2 \frac{T - T_H}{T_m - T_H} \right), \quad (3)$$

T_n, T_m – температуры начала и максимума кристаллизации парафина соответственно,

C – постоянная для данной нефти величина,

L_1 – удельная энтальпия фазового превращения парафина. Скорость фильтрации подчиняется закону Дарси:

$$\vec{w} = -\frac{k}{\mu} \nabla P. \quad (4)$$

В основу положено также уравнение теплопроводности флюида

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (5)$$

Рассмотрим волновые поля давления и скорости, возникающие в пористой среде в процессе фильтрации жидкости в определенных условиях. Пласт считается однородным и изотропным.

Предположим, что твердая фаза парафина и скелет несжимаемы и поле давления в пористой среде определяются, в основном, сжимаемостью несущей жидкой фазы; температура T и связанные с ней параметры s_{Π} , s_H , s существенно не меняются за период фильтрационно-волновых колебаний, то есть являются адиабатическими параметрами.

Тогда в адиабатическом приближении уравнение для фильтрации сжимаемой жидкости запишем в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \kappa \Delta P = 0, \quad (6)$$

где $\kappa = \frac{\rho_0}{m(1-s)} \frac{k(s_H)}{\mu(s_{\Pi})} f(s_{\Pi})$ – коэффициент пьезопроводности.

Уравнение (6) называют также уравнением упругого режима. Коэффициент пьезопроводности κ характеризует скорость перераспределения пластового давления при неустановившейся фильтрации упругой жидкости в упругой пористой среде. Наиболее часто встречающиеся в нефте-

промышленной практике значения коэффициента пьезопроводности заключены в пределах от 0.1 до 5 м²/с.

Рассмотрим задачу об изменении температуры жидкости при колебательном движении в пористой среде с учетом фазовых переходов, обусловленных растворением парафина. Пусть горизонтальный пласт представлен в виде трех полубесконечных областей, с плоскими границами раздела, перпендикулярными оси z . Первая I и вторая II области непроницаемы; средняя область толщины $2h$, расположенная горизонтально, является пористой и насыщена парафинистой нефтью. Будем рассматривать случай радиального колебательного движения парафинистой нефти в средней области $-h < z < h$. При описании температурной задачи примем, что температура нефти, парафина и скелета пористой среды в каждой точке совпадают, отлична от нуля только радиальная координата скорости конвективного переноса тепла, т.е. $U_r \neq 0$, $U_\varphi = 0$, $U_z = 0$.

Решение задачи в предельном случае нулевого приближения с учетом фазовых переходов соответствует отысканию осредненной по толщине пласта температуре. Задача для нулевого приближения с учетом парафинизации примет вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} - \frac{a_{r1}}{a_{z1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) - \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} = 0, \quad z > 1, \quad r > 0, \quad t > 0, \quad (7)$$

$$\Phi_1(T) \frac{\partial T}{\partial t} + u_{ef}(r,t) \Phi_2(T) \frac{\partial T}{\partial r} + f(r,t) = \frac{\chi}{2} \left(\frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=1} - \frac{\lambda_{z2}}{\lambda_{z1}} \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=-1} \right), \quad (8)$$

$$t > 0, \quad r > 0, \quad |z| < 1;$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} - \frac{a_{r2}}{a_{z1}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) - \frac{a_{z2}}{a_{z1}} \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = 0, \quad z < -1, \quad r > 0, \quad t > 0. \quad (9)$$

Граничные и начальные условия

$$T|_{z=1} = T_2|_{z=-1} = T, \tag{10}$$

$$T_1|_{t=0} = T_2|_{t=0} = T|_{t=0} = 0, \tag{11}$$

$$\lim T_{1,2}|_{r+|z| \rightarrow \infty} = 0. \tag{12}$$

За одно колебательное движение температура фильтрующейся жидкости изменяется незначительно, поэтому зависимостью скорости конвективного переноса тепла от температуры пренебрегаем. Зависимость для определения температуры фильтрующейся жидкости с учетом парафинизации примет вид

$$\Phi_1(T) \frac{\partial T}{\partial t} + U_{ef}(r,t) \Phi_2(T) \frac{\partial T}{\partial r} - D_1(r) \sin^2 \omega t - D_2(r) \cos \omega t = 0, \tag{13}$$

где $D_1(r) = \varepsilon_{ef} \frac{c_m}{c_n} \frac{k}{\mu r} \frac{P_0^2}{\ln^2 \left(\frac{r_0}{R} \right)}$, $D_2(r) = \eta_{ef} P_0 \frac{\ln(r/R)}{\ln(r_0/R)}$.

Решим уравнение (13) используя программный пакет Delphi. Для этого воспользуемся методом сеток.

Основные результаты представлены в виде следующих трехмерных графиков:

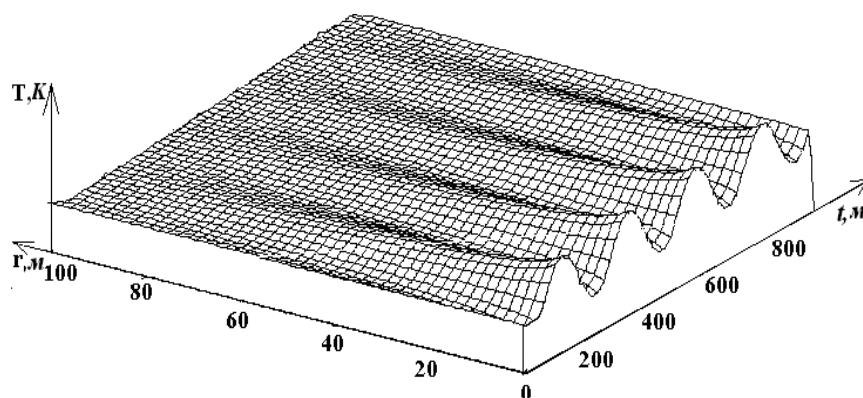


Рис. 1 График зависимости температуры от радиального расстояния $r, м$ и времени $t, с$:
 $\omega := 0.32 Гц$; $r_0 := 0.1 м$;
 $k = 9 \cdot 10^{-11} м^2 / Дж$;
 $\mu = 11.7 \cdot 10^{-3} Па \cdot с$;
 $R := 100 м$; $P_0 = 1 \cdot 10^6 Па$;
 $\varepsilon_{ef} := 0.04 \cdot 10^{-5} К / Па$;
 $\eta_{ef} := 0.0137 \cdot 10^{-5} К / Па$;
 $c_ж = 1600000 Дж / (м^3 \cdot К)$;
 $c_n = 2120000 Дж / (м^3 \cdot К)$.

Как видно из графика температура возрастает с течением времени по закону синуса, а по радиусу убывает.

Разработанная математическая модель процесса подтверждает возможность практического использования фильтрационно-волнового нагрева пластов для увеличения нефтеотдачи и позволяет рассчитывать температурные поля в практических условиях.

Выводы. В работе развита теория баротермического эффекта при колебательном движении жидкостей в пористой среде с учетом теплового взаимодействия нефтяного пласта с окружающими породами и фазовых переходов вследствие растворения парафинов. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных подтвердило возможность использования первого приближения для расчетов реальных термодинамических процессов в фильтрационно-волновых полях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
2. Ефимова Г.Ф. Математическое моделирование температурных процессов в фильтрационно-волновых полях с учетом фазовых переходов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Стерлитамак, 2004
3. Филиппов А.И., Хисматуллин А.С., Михайлов П.Н. Фильтрационно-волновой нагрев нефтяного пласта // Инженерная физика М.: Научтехиздат, 2006., №5, С. 13 – 22.
4. Филиппов, А.И. Установка для исследования коэффициента температуропроводности в жидкости / А.И. Филиппов, М.Р. Минлибаев, А.С. Хисматуллин // Новые промышленные технологии. 2010. № 2. С. 62 – 63.
5. Хисматуллин А.С., Филиппов А.И., Минлибаев М.Р., Серебренников Н.П. Определение коэффициента трансилляторного переноса при барботаже в жидкости // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. - № 2. – С. 52 - 53.
6. Хисматуллин А.С., Сагитов К.И., Абсаров И.Х. Увеличение нефтеотдачи пласта при помощи фильтрационно-волнового нагрева //Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 4. № 7. С. 103-107.
7. Хисматуллин А.С., Минлибаев М.Р., Сагитов К.И., Абсаров И.Х. Исследование зависимости работы, необходимой для извлечения жидкости из пласта, от его пористости // Успехи современной науки. 2016. Т. 4. № 7. С. 92-97.
8. Хисматуллин А.С., Кузнецов А.С., Мусин А.Р., Вильданов Р.Р., Юсупов Р.Р., Когот А.Ю. Исследования технического состояния трансформаторных подстанции 10, 35 и 110 кВ // Успехи современной науки. 2017. Т. 4. № 1. С. 55-59.

9. Хисматуллин А.С. Совместная фильтрация двух несмешивающихся жидкостей в пластах // XII Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых материалы конференции и тезисы докладов. 2006. С. 690-691.
10. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. М.:Недра. 1965. 238 с.
11. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1971. – 940 с.

References

1. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. Dvizhenie zhidkostej i gazov v prirodnyh plastah. M.: Nedra, 1984. 211 s.
2. Efimova G.F. Matematicheskoe modelirovanie temperaturnyh processov v fil'tracionno-volnovyh poljah s uchetom fazovyh perehodov // Dissertacija na soiska-nie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskix nauk. Sterlitamak, 2004
3. Filippov A.I., Hismatullin A.C., Mihajlov P.N. Fil'tracionno-volnoj nagrev neftyanogo plasta // Inzhenernaya fizika M.: Nauchtekhizdat, 2006g., №5, С. 13 – 22.
4. Filippov, A.I. Ustanovka dlya issledovaniya koehfficienta temperaturoprovodnosti v zhidkosti / A.I. Filippov, M.R. Minlibaev, A.S. Hismatullin // Novye promyshlennye tekhnologii. 2010. № 2. s. 62.
5. Hismatullin A.S., Filippov A.I., Minlibaev M.R., Serebrennikov N.P. Opredelenie koehfficienta transcillyatornogo perenosa pri barbotazhe v zhidkosti // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2010. - № 2. – S. 52-53.
6. Hismatullin A.S., Sagitov K.I., Absatarov I.H. Uvelichenie nefteotdachi plasta pri pomoshchi fil'tracionno-volnovogo nagreva //Uspekhi sovremennoj nauki i obrazovaniya. 2016. T. 4. № 7. S. 103-107.
7. Hismatullin A.S., Minlibaev M.R., Sagitov K.I., Absatarov I.H. Issledovanie zavisimosti raboty, neobhodimoj dlya izvlecheniya zhidkosti iz plasta, ot ego poristosti // Uspekhi sovremennoj nauki. 2016. T. 4. № 7. S. 92-97.
8. Hismatullin A.S., Kuznecov A.S., Musin A.R., Vil'danov R.R., YUsupov R.R., Kogot A.YU. Issledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya transformatornyh podstancii 10, 35 i 110 kV // Uspekhi sovremennoj nauki. 2017. T. 4. № 1. S. 55-59.
9. Hismatullin A.S. Sovmestnaja fil'tracija dvuh nesmeshivajushhihsja zhidkostej v plastah / XII Vserossijskaja nauchnaja konferencija studentov-fizikov i molodyh uchenyhmaterialy konferencii i tezisy dokladov. 2006. S. 690-691.
10. Chekalyuk E.B. Termodinamika neftyanogo plasta. M.:Nedra. 1965, 238 s.
11. Yavorskij B. M., Detlaf A. A. Spravochnik po fizike. – M.: Nauka, 1971. – 940 s.