УДК 622.323+532.546

РАСЧЁТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРОГРЕВА НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Тютяев А.В., Должиков А.С., Зверева И.С.

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», Самара, e-mail: tyutyaev@mail.ru

Рассмотрена плоскорадиальная однотемпературная задача распространения тепла от нагреваемой скважины в пласт и фильтрационного течения холодного флюида к скважине. Разработана математическая модель неизотермического течения вязкой жидкости к скважине, включающая уравнения переноса тепла в цилиндрических координатах, уравнение неразрывности, закон Дарси для скорости фильтрации жидкости. Зависимость вязкости от температуры принималась экспоненциальной. Поставленная задача решалась методом конечных разностей по неявной схеме. Так как время гидродинамической стабилизации намного меньше тепловой, для решения тепловой задачи можно выбрать развитый профиль течения под действием постоянного градиента давления. Анализ показал, что профиль температуры в пористой среде сильно зависит от начальной скорости фильтрации жидкости – критерия Пекле, отношения конвективного теплопереноса к кондуктивному. При больших значениях Пекле конвективный поток холодной фильтрующейся жидкости прижимает зону прогрева к скважине, при малых – зона прогрева определяется теплопроводностью пористого скелета.

Ключевые слова: призабойная зона пласта, электропрогрев, температурное поле

CALCULATION METHOD OF EFFICIENCY EVALUATION AT OIL WELLS ELECTRIC HEATING

Tyutyaev A.V., Dolzhikov A.S., Zvereva I.S.

Samara state technical university, Samara, e-mail: tyutyaev@mail.ru

In this paper a plane-radial single-temperature problem of propagation of heat from the heated wells into the reservoir and filtration flow of cold fluid to the well is presented A mathematical model of non-isothermal flow of a viscous fluid to the well, includes heat transfer equation in cylindrical coordinates, the equation of continuity, Darcy's law for fluid filtration rate. The dependence of viscosity on temperature was assumed exponential. The problem is solved by finite difference method for the implicit scheme. Since the time of the hydrodynamic stabilization is much less heat to solve the heat problem, you can choose the developed flow profile under constant pressure gradient. Analysis showed that the temperature profile in a porous medium is strongly dependent on the initial velocity of the liquid-filtering Peclet number, the convective heat transfer relationship to conducted. For large values of the Peclet convective flow of cold filtered fluid pushes the warm zone to the well for small – warm zone is determined by the thermal conductivity of the porous medium.

Keywords: bottom hole, electric heating, temperature field

При бурении и последующей эксплуатации нефтяных скважин в призабойной зоне образуются органические и неорганические структуры, приводящие к повышению фильтрационного сопротивления и снижению производительности скважин. Для снижения фильтрационного сопротивления и восстановления потенциальной производительности скважин необходимо разрушение этих структур в процессе физико-химической обработки. Экспериментальные и промысловые исследования позволили определить состав отложений в околоскважинной области пласта, однако механизмы возникновения этих отложений и возникновения дополнительного фильтрационного сопротивления в этой зоне изучены недостаточно. В этом случае применяемые методы интенсификации притока скважинной жидкости часто необоснованны, параметры этих методов неоптимизированы и имеют низкую эффективность [1].

При таких обстоятельствах альтернативы тепловым методам воздействия на призабойную зону в настоящее время, по-видимому, нет, поскольку повышение температуры пластового флюида однозначно уменьшает его вязкость и способствует растворению парафинов [2]. Тепловое воздействие на призабойную зону пласта снижает вероятность образования парафинистых и смолистых отложений и способствует увеличению текущей и суммарной добычи нефти, увеличивает межремонтный период эксплуатации скважины, так как уменьшается количество парафина на стенках труб и в выкидных линиях. В большинстве случаев с их помощью удается добиться существенного увеличения притока жидкостей либо повышения приемистости нагнетательных скважин. В других случаях эффект от тепловых воздействий отсутствует. Это объясняется тем, что пока недостаточно ясны механизмы разнообразных явлений,

сопровождающих распространение тепла по флюидонасыщенным пористым средам.

Цель исследования. Для решения вопросов применения тепловых методов обработки пласта и оптимизации параметров этих методов необходима разработка и анализ простой математической модели прогрева скважины и пласта и проведения с помощью этой модели оценки эффективности, например, электропрогрева скважины. Такая модель позволит оценить характерные параметры прогрева нефтедобывающих скважин, разработать инженерный модуль по расчёту эффективности электропрогрева нефтяных скважин и использовать эту модель для оценки комбинированных методов воздействия на пласт [3].

Материалы и методы исследования

Рассмотрим плоскорадиальную задачу распространения тепла от нагреваемой скважины в пласт и фильтрационного течения холодного флюида к скважине. В этом случае уравнение теплопереноса имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{C_p}r\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_0\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{v_f\cdot\rho_f\cdot c_f}{C_p}\frac{\partial T}{\partial r}, \qquad (1)$$

где $v_f=\frac{Q}{2\pi rh}$ – скорость фильтрации; ρ_f, c_f – плотность и удельная теплоемкость пластового флюида; λ_0 – коэффициент теплопроводности пласта; C_p – объемная теплоемкость пласта; Q – дебит скважины.

Уравнение неразрывности для пластовой жидкости:

$$\frac{\partial(m\rho_f)}{\partial t}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho_f v_f\, r)=0, \qquad (2)$$

где m – пористость среды.

Закон фильтрации Дарси:

$$v_f=-\frac{k}{\mu}\frac{\partial p}{\partial r}, \qquad (3)$$

где k – проницаемость породы; μ – вязкость.

Пусть вязкость флюида зависит от температуры:

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

где μ_0 – вязкость при пластовой температуре T_0; γ – температурный коэффициент вязкости.

Оценки показывают, что время гидродинамической стабилизации намного меньше тепловой [4]. Поэтому для решения тепловой задачи можно выбрать развитый профиль течения под действием постоянного градиента давления. С учётом этого из уравнений (2) и (3) получим эффективность прогрева как отношение дебитов после прогрева Q и до прогрева Q_0 [3]:

$$Q=Q_0\frac{\mu_0\ln\left(\frac{r_k}{r_0}\right)}{\int_{r_0}^{r_k}\frac{\mu(T)}{r}dr}, \qquad (4)$$

здесь Q_0, r_0 и r_k – первоначальный дебит, радиус и радиус контура питания скважины.

Граничные условия на забое скважины и на радиусе контура питания имеют вид

$$T(r_0,t)=T_c,\quad \frac{\partial T(r_k,t)}{\partial r}=0.$$

В безразмерных переменных:

$\theta=\frac{T-T_0}{T_c-T_0}$ – безразмерная температура;

$\tau=\frac{ta}{r_0^2}$ – безразмерное время;

($a=\frac{\lambda_0}{C_p}$ – коэффициент температуропроводности пласта);

$x=\frac{r}{r_0}$ – безразмерная координата.

Уравнение (1) запишется следующим образом:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left(x\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)+uPe\frac{\partial\theta}{\partial x}, \qquad (5)$$

где $u=\frac{v}{v_0}=\frac{v2\pi r_0P}{Q_0}=\frac{Q}{Q_0}\frac{1}{x}$ – безразмерная скорость фильтрации флюида; P – мощность пласта; $Pe=\frac{\rho_f c_f}{\lambda_0}\frac{Q_0}{2\pi P}$ – число Пекле, отношение конвективного теплопереноса к кондуктивному.

Если ввести обозначения $\frac{r_k}{r_0}=m$ (m = 2, 3, 4, 5, 6...), то x = 1 – скважина, x = m – контур.

Условие (4) запишется следующим выражением:

$$\frac{Q}{Q_0}=\frac{\ln m}{\int_1^m\frac{e^{-k\theta}}{x}dx}, \qquad (6)$$

где $\gamma(T_C-T_0)=k$.

Результаты исследования и их обсуждение

Сформулированная задача решалась численно конечно-разностным методом по неявной схеме [5].

При вычислениях приняты следующие параметры среды:

λ_0 = 1,28 Вт/(м·К); C_p = 1378000 Дж/(м^3·К);

ρ_f = 949 кг/м^3; C_f = 1873 Дж/(м^3·К);

μ_0 = 1,318 Па·с; γ = 0,064 К$^{-1}$; h = 8 м.

На рис. 1 показана зависимость эффективности прогрева (повышение дебита скважины при разных начальных дебитах (до обработки) $Q_0=q$ в зависимости от температурного коэффициента вязкости, при времени прогрева τ = 10. Наибольшую эффективность прогрева могут показать скважины с наименьшим начальным дебитом, поскольку при малых дебитах может формироваться достаточно широкая зона прогрева.

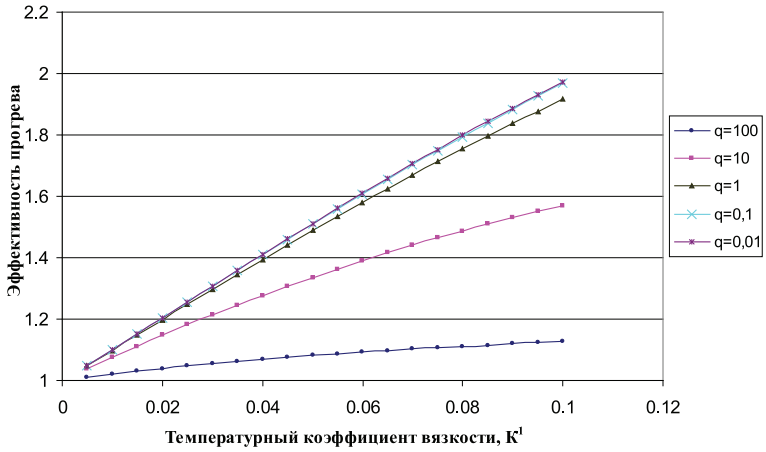

Рис. 1. Зависимость эффективности прогрева от температурного коэффициента вязкости

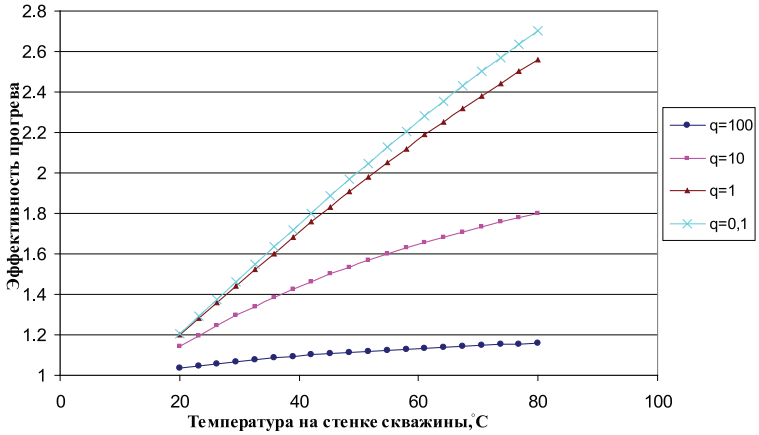

Рис. 2. Зависимость эффективности прогрева от температуры нагревателя

На рис. 2 показана зависимость эффективности прогрева от температуры нагревателя (на стенке скважины) при разных начальных дебитах и постоянной температуре на контуре $T_0 = 20°C$, при времени прогрева $\tau = 10$.

Зависимости показывают, что влияние температуры подогрева на эффективность тем сильнее, чем меньше начальный дебит скважины.

На рис. 3 приведены профили распределения безразмерной температуры в пласте при разных дебитах, при времени прогрева $\tau = 10$.

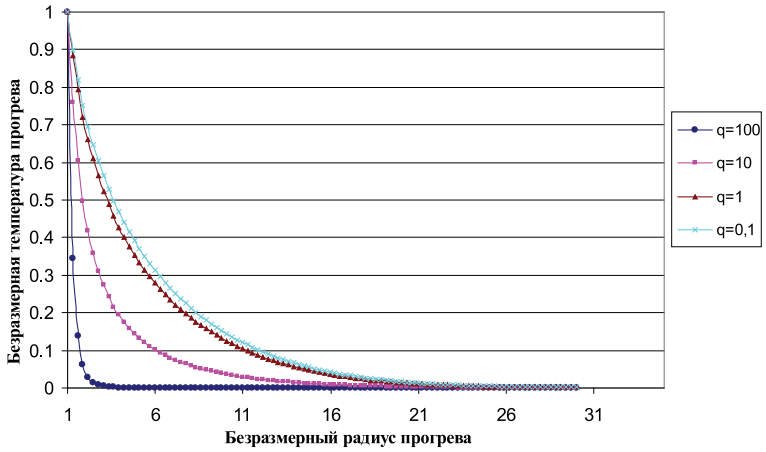

Рис. 3. Распределение температуры в пласте

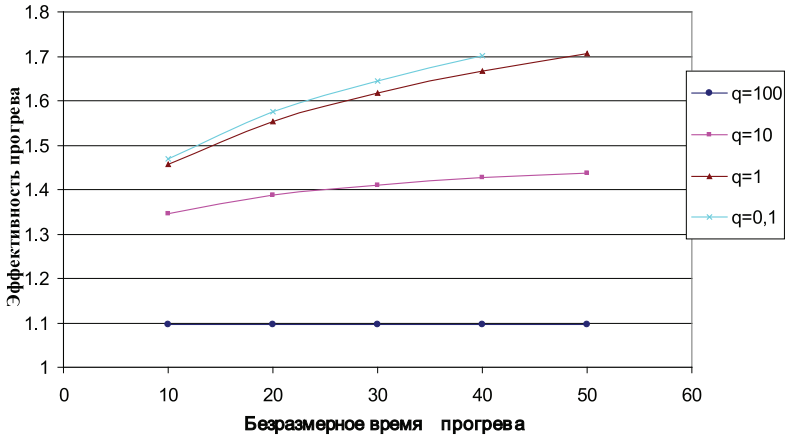

Рис. 4. Зависимость эффективности прогрева от времени нагрева

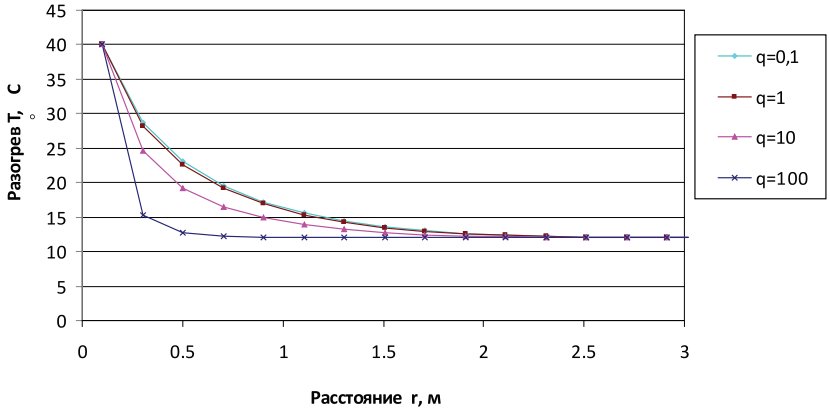

Рис. 5. Профиль температур в пласте при T_0 = 12 °C, T_C = 40 °C, r_0 = 0,15 м

Рис. 4 показывает зависимость эффективности прогрева от времени работы нагревателя для разных дебитов.

Рис. 5 показывает распределение температур в пласте для разных дебитов скважины.

Заключение

Приведённые зависимости имеют очевидное объяснение, подтвержденное опытом применения электропрогрева для интенсификации притока скважинной жидкости – прогрев скважины наиболее эффективен для малодебитных скважин.

Список литературы

1. Абдулин Ф.С. Повышение производительности скважин. – М.: Недра, 1975. – 264 с.

2. Баренблатт Г.П., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. – М.: Недра, 1972. – 290 с.

3. 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. 127–150.

4. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

5. Сучков Б.М. Температурные режимы работающих скважин и тепловые методы добычи нефти. – М.: Ики, 2007. – 406 с.

References

1. Abdulin F.S. Povyshenie proizvoditelnosti skvazhin M., «Nedra», 1975. 264 p.

2. Barenblatt G.P., Entov V.M., Ryzhik V.M. Teorija nestacionarnoj filtracii zhidkosti i gaza.M., «Nedra», 1972. 290 p.

3. Izmajlova G.R., Kovaleva L.A., Nasyrov N.M. Matematicheskoe modelirovanie sovmestnogo vozdejstvija vysokochastotnogo jelektromagnitnogo i akusticheskogo polej na neftjanoj plast. «Neftegazovoe delo». 2014. no. 4, pp. 127–150.

4. Samarskij A.A. Vvedenie v teoriju raznostnyh shem. M.: Nauka, 1977. 656 p.

5. Suchkov B.M. Temperaturnye rezhimy rabotajushhih skvazhin i teplovye metody dobychi nefti. M.: Iki, 2007. 406 p.

Рецензенты:

Миронов В.М., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Общая физика и физика нефтегазового производства», Самарский государственный технический университет, г. Самара;

Митлина Л.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Общая физика и физика нефтегазового производства», Самарский государственный технический университет, г. Самара.