## УДК 621.315

# УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН С ПАРАФИНОВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ И НИЗКИМ ДИНАМИЧЕСКИМ УРОВНЕМ

© 2012 Л.А. Ковригин, И.Б. Кухарчук

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

### Поступила в редакцию 23.11.2012

В работе исследуется тепловой метод удаления парафиновых отложений в нефтяных скважинах с помощью греющего кабеля. Разрабатывается система автоматического управления удалением парафиновых отложений, которая позволяет прогнозировать оптимальную величину тока в греющем кабеле и минимальное время его работы. Определяется температурное поле в межтрубном пространстве и скорость конвективного теплового потока. Рассчитывается тепловое сопротивление воздушного зазора.

Ключевые слова: нефтяная скважина, греющий кабель, парафиновые отложения, тепловое поле

Эксплуатация нефтяных скважин во многих регионах России осложняется отложениями асфальтенов, смол и парафинов на стенках насосно-компрессорных труб (НКТ). Основными компонентами отложений являются парафины, содержание которых изменяется от 20 до 70% (по массе). В забое парафин растворен в нефти, так как температура на глубине 1000-3500 м выше температуры его плавления. По мере поднятия нефти происходит понижение ее температуры и резкое снижение растворимости в ней парафина, что ведет к интенсивному его осаждению на внутренней поверхности насоснокомпрессорных труб (рис. 1). Это приводит к снижению притока жидкости к забою и повышению гидравлических сопротивлений скважин, что снижает их продуктивность [2]. Одним из методов предупреждения образования парафиновых пробок и профилактического удаления парафиновых отложений является нагрев скважины с помощью греющего кабеля [1]. Для уменьшения потребления электроэнергии целесообразно кабель включать периодически с учетом распределения температуры по глубине скважины (геотермы) и скорости движения неф-ТИ.

Скважина представляет собой многослойную структуру, состоящую из нескольких зон, обладающих различными теплопроводностями, плотностями и теплоемкостями. На рис. 2 представлены поперечные сечения скважины на четырех различных глубинах и соответствующие им зоны.

Ковригин Леонид Александрович, доктор технических наук, профессор. E-mail: KovriginLA@mail.ru Кухарчук Ирина Борисовна, старший преподаватель. E-mail: kuharchuk\_ib@mail.ru



**Рис. 1.** Отложение парафина на стенках НКТ: 1 – электродвигатель, 2 – насос, 3 – обсадная, 4 – греющий кабель 5 – насосно-компрессорная труба, 6 – динамический уровень нефти, 7 – отложения парафина, 8 – выкидная труба, 9 – датчик температуры, 10 – компьютер, 11 – силовой блок, 12 – поверхность земли, 13 – силовой кабель,  $T_{yu}$  – температура, измеренная на устье,  $I_{\text{нагр}}$  – ток нагрева,  $t_{\text{нагр}}$  – время нагрева



Рис. 2. Поперечный разрез скважины:

радиусы:  $r_1$  –токопроводящей жилы,  $r_2$  – кабеля,  $r_3$  – парафиновых отложений,  $r_4$  – внутренний НКТ,  $r_5$  – внешний НКТ,  $r_6$  – внутренний обсадной колонны,  $r_7$  – внешний обсадной колонны; зоны: 1 – токопроводящая жила нагревательного кабеля постоянного тока, 2 – изоляция, 3 – нефть, 4 – парафиновые отложения, 5 – НКТ, 6 – воздушно-газовая смесь, 7 – обсадная колонна (ОК), 8 – нефть

Ставится задача: ликвидировать парафиновые отложения с внутренней поверхности НКТ путем нагрева движущейся от забоя к устью нефти до температуры выше температуры затвердевания парафина с помощью нагревательного кабеля, расположенного внутри НКТ. В силу того, что каждая нефтяная скважина характеризуется своими геотермой и количеством добываемой нефти, необходим индивидуальный подход к расчету тока нагрева, который должен быть достаточным для удаления парафина, и при этом температура не должна превышать рабочую температуру изоляции кабеля. Для решения поставленной задачи, необходимо решить систему дифференциальных уравнений (энергии, движения), замкнутых краевыми и начальными условиями. Задача является нестационарной трехмерной осесимметричной. Расчет ведется методом конечных разностей по явной схеме с учетом распределения температуры по глубине скважины, рассеивания тепла в грунт и переноса тепла за счет движения нефти от забоя к устью по маршевой схеме. На рис. 3 показана блоксхема для расчета тока нагрева и времени его действия.

Порядок вычисления:

1. Вводятся данные: геотерма  $(T_r)$ , максимально допустимая температура изоляции кабеля  $(T_{max})$ , температура плавления парафина  $(T_{mn})$ , измеренный расход  $(Q_z)$ , теплофизические и

реологические свойства материалов (ρ, λ, *C*, μ) и геометрические размеры (G).





2. Устанавливается ток в жиле нагревательного кабеля  $I_{\text{ж}} = 0$ , время t = 0, глубина  $L = L_{\text{max}}$ (расчет ведется от забоя к устью).

3. Вычисляется в скважине распределение по радиусу и глубине с определенным шагом  $L = L - \Delta L$ : температуры  $(T_r)$ , скорости  $(V_{r,z})$  нефти и давления  $(P_z)$ .

4. Увеличивается расчетное время ( $t = t + \Delta t$ ) и расчет ведется до тех пор, пока  $\Delta T/T < \varepsilon$ , т.е. до стабилизации температуры ( $\varepsilon = 0,01$ ).

5. В том случае, если расчетная температура на устье  $(T_{yp})$  меньше температуры плавления парафина  $(T_{nn})$  добавляется расчетный ток нагрева  $I_{\pi} = I_{\pi} + \Delta I_{\pi}$  и вычисления повторяются. При выполнении условий  $T_{yp} > T_{nn}$  (расчетная температура на устье выше температуры плавления парафина) расчет прекращается и на нагревательный кабель подается ток нагрева  $I_{harp} = I_{\pi}$  на время  $t_{harp} = t$ . 6. В том случае, если во время расчета температура на жиле  $(T_{\rm ж})$  превысит допустимую температуру изоляции кабеля  $(T_{\rm max})$  выдается сообщение «перегрев» и расчет прекращается.

Идентификация модели производится автоматически на каждой скважине при первом запуске системы. Функциональная схема, реализующая поставленную задачу, представлена на рис. 4.



### **Рис. 4.** Функциональная схема: УУ – устройство управления, ОУ – объект управления

Вычисленный ток нагрева  $I_{\text{нагр}}$  и время нагрева  $t_{\text{нагр}}$  передаются на объект управления (скважина с греющим кабелем). По истечению времени нагрева с датчика температуры ( $T_{yn}$ ) объекта, расположенного на устье скважины, поступает информация на УУ, где сравнивается с расчетной температурой ( $T_{yp}$ ). Идентификация модели проводится из условия:

$$|T_{\rm yu} - T_{\rm yp}| < \delta T,$$

где  $\delta T = 1$ °С.

В случае не выполнения этого условия производится корректировка модели.

Расчет допустимого тока нагрева требует расчета тепловых сопротивлений элементов конструкции скважины. Большую сложность представляет определение теплового сопротивления воздуха в межтрубном пространстве. На рис. 5 представлена тепловая схема замещения нефтяной скважины. Тепловой поток, идущий от токопроводящей жилы греющего кабеля, проходит через тепловое сопротивление изоляции (S<sub>из</sub>); нефти, находящейся между кабелем и отложениями парафина ( $S_{\rm H}$ ); отложений парафина ( $S_{\rm n}$ ); тепловое сопротивление воздуха (S<sub>в</sub>) и тепловое сопротивление грунта ( $S_0$ ). НКТ и обсадная колонна выполнены из стали, которая обладает хорошей теплопроводностью по отношению к остальным материалам (нефти, парафину, грунту), поэтому при решении задачи не учитываются.

$$T_{\mathsf{H}} \xrightarrow{T_1} T_2 \xrightarrow{T_2} T_0$$

#### Рис. 5. Тепловая схема замещения:

 $S_{\rm H3}$  — тепловое сопротивление изоляции,  $S_{\rm H}$  — тепловое сопротивление нефти,  $S_{\rm II}$  — тепловое сопротивление парафина,  $S_{\rm B}$  — тепловое сопротивление воздуха,  $S_0$  — тепловое сопротивление грунта,  $T_{\rm X}$  — температура токопроводящей жилы,  $T_1$  — температура НКТ,  $T_2$  — температура ОК,  $T_0$  — температура грунта

Большую сложность представляет определение тепломассообмена в межтрубном пространстве. Необходимо определить скорости конвективного теплового потока за счет разности температур НКТ ( $T_1$ , рис. 5) и ОК ( $T_2$ ) и температурного поля в межтрубном пространстве. Скважина расположена горизонтально. Конвекция свободная. Радиус насосно-компрессорной трубы  $R_{\rm HKT}$  = 36,5 мм, обсадной колонны  $R_{\rm OK}$  = 66 мм. Кольцевой зазор заменяется зазором между двумя параллельными пластинами, равным а = *R*<sub>OK</sub> – *R*<sub>HKT</sub>=29,5 мм. Теплофизические характеристики воздуха: теплопроводность, теплоемкость и плотность зависят от температуры. Задача решается с помощью среды моделирования ANSYS. На рис. 6 представлены эпюры скоростей конвективного теплового потока для варианта: температура HTK – 20°С, температура OK  $-0^{\circ}$ С. На рис. 6 видно, что в конвективных потоках возникают вихри, что согласуется с [3]. Расстояние между центрами ячеек составляет *b*=81,7 мм. Число Рейнольдса Re=U\**a*/v=430, где: скорость U=0,204 м/с, кинематическая вязкость  $v=1,4\cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. На рис. 7 показано температурное поле в межтрубном пространстве.

Тепловой поток передается от стенки с температурой T<sub>1</sub> стенке с температурой T<sub>2</sub> за счет вихревого движения (рис. 6) и одновременно поднимается вверх. Плотность теплового потока на стенке неодинакова по высоте, средняя плотность потока  $P = 80 \text{ Bt/m}^2$ . Тепловое сопротивление воздуха в зазоре, в соответствие с тепловым законом Ома,  $S_{\rm B} = (T_1 - T_2)/P = 20/80 =$ 0,25°С\*м<sup>2</sup>/Вт. Откуда удельное тепловое сопротивление плоской модели: для  $\sigma_{\rm B} = S_{\rm B}/a = 0.25/0.0295 = 8.47^{\circ} {\rm C*_M/BT}$ . Тепловое сопротивление воздушного зазора между НКТ и ОК для цилиндрической модели на длине 1 м равно:

$$S_{\rm B} = \frac{\sigma_{\rm B}}{2\pi} \ln(\frac{R_{\rm OK}}{R_{\rm HKT}}) = \frac{8,47}{2\pi} \ln(\frac{66}{36,5}) = 0.8^{\circ} C.M/Bm$$

Рассмотренный метод расчета теплового сопротивления воздуха в межтрубном пространстве нефтяной скважины предназначен для расчета тока нагрева греющего кабеля.

Выводы: разработана математическая модель расчета оптимального тока нагрева и минимального времени работы греющего кабеля для удаления отложений асфальтенов, смол и парафинов на стенке насосно-компрессорной трубы в нефтяной скважине. Расчет тока нагрева ведется с учетом того, чтобы температура изоляции кабеля не превышала допустимую, и в тоже время происходило плавление парафина. Модель учитывает распределение температуры по глубине скважины, дебит, теплофизические и реологические свойства скважинной жидкости. Исследован теплообмен в воздушном пространстве между НКТ и ОК, определено тепловое сопротивление.



Рис. 6. Скорость конвективного теплового потока в межтрубном пространстве

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Малышев, А.Г. Выбор оптимальных способов борьбы с парафиногидратообразованием / А.Г. Малышев, Н.А. Черемсин, Г.В. Шевченко // Техника и технология добычи нефти. 1997. №9. С. 62-69/
- Персиянцев, М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 653 с.

 Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. – М.: «Высшая школа», 1988. 479 с.



Рис. 7. Температурное поле в межтрубном пространстве

# CONTROL OF THE OIL WELLS TEMPERATURE FIELD WITH PARAFFIN DEPOSITS AND LOW DYNAMIC LEVEL

## © 2012 L.A. Kovrigin, I.B. Kuharchuk

## Perm National Research Polytechnical University

In work the thermal method of removal the paraffin deposits in oil wells by means of a heating cable is investigated. The system of automatic control is developed for removal the paraffin deposits which allows to predict optimum size of current in heating cable and minimum time of its work. The temperature field in intertubes space and speed of convective thermal stream is defined. Thermal resistance of air gap is calculated.

Key words: oil well, heating cable, paraffin deposits, thermal field