ISSN 2079-3316 ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ: ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ т. 13, № 3(54), с. 165–177 научная статья искусственный интеллекту, интеллектуальные системы, нейронные сети

УДК 519.876.5:532.54 о 10.25209/2079-3316-2022-13-3-165-177

Расчет взаимосвязанных температурных процессов в погружном электродвигателе, горных породах и газоводонефтяном потоке в скважине

Владимир Михайлович Конюхов¹, Иван Владимирович Конюхов²[№], Альбина Рамиловна Ганиева³

^{1,3} Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия ² Университет Иннополис, Иннополис, Россия

^{2⊠}i.konyukhov@innopolis.ru

(подробнее об авторах на с. 176)

Аннотация. Исследуются взаимосвязанные нестационарные тепловые процессы в погружном электродвигателе насосной установки, расположенной в потоке пластовой водонефтегазовой смеси, обтекающей двигатель в нефтедобывающей скважине и горных породах, окружающих скважину. Для расчета температурных характеристик разработаны математическая, численная и алгоритмическая модели, реализованные в программном комплексе, позволяющем методом вычислительного эксперимента с одновременной визуализацией результатов расчетов изучать температурный режим электродвигателя и тепловые эффекты в трехфазном потоке, движущемся в кольцевом зазоре между обсадной колонной скважины и двигателем, с учетом его теплообмена с горными породами. Показано, что переходные тепловые процессы, возникающие в системе «двигатель – трехфазный поток – породы» при отключении двигателя из-за его перегрева, зависят от физических и геометрических характеристик каждого элемента этой системы. Расчетные оценки продолжительности (десятки минут) стадии охлаждения двигателя после выключения и стадии его нагрева при повторном включении согласуются с реальными временами этих процессов в нефтяных скважинах.

Ключевые слова и фразы: математическое моделирование, метод конечных разностей, компьютерное моделирование, тепломассоперенос, водонефтегазовая смесь, горные породы, электроцентробежный насос, погружной электродвигатель, вычислительный эксперимент

Благодарности:

³Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»)

Для цитирования: Конюхов В.М., Конюхов И.В., Ганиева А.Р. *Расчет* взаимосвязанных температурных процессов в погружном электродвигателе, горных породах и газоводонефтяном потоке в скважине // Программные системы: теория и приложения. 2022. **Т. 13**. № 3(54). С. 165–177. http: //psta.psiras.ru/read/psta2022_3_165-177.pdf

 © Конюхов В.М., Конюхов И.В., Ганиева А.Р.
 2022
 ©)

 This Article in English:
 http://psta.psiras.ru/read/psta2022
 3
 179-191.pdf



Введение

Тепловые процессы в нефтяной добывающей скважине, оборудованной погружной установкой электроцентробежного насоса (ЭЦН), обусловлены взаимодействием погружного электродвигателя (ПЭД) насосной установки, водонефтегазового потока в кольцевом пространстве между ПЭД и обсадной колонной скважины и окружающими ее горными породами. Каждый из этих элементов характеризуется собственным строением, геометрическими и физическими параметрами. Спецификой задачи является существенная неоднородность трехфазного потока, который обтекает двигатель и затем поступает на прием насосного узла. Физико-химические свойства (плотность, вязкость, теплоемкость и т. д.) нефти, воды и попутного газа, поступающих в скважину из нефтяного пласта и входящих в состав водонефтегазовой смеси, оказывают существенное влияние как на тепловой режим двигателя, так и на взаимодействие потока с горными породами [1–3]. При неправильном подборе типа насосной установки скорость потока трехфазной смеси может оказаться недостаточной для охлаждения ПЭД, из-за чего может произойти его недопустимый перегрев [1, 4–6]. В таких случаях во избежание аварии наземная станция управления автоматически отключает двигатель, что, естественно, приводит к прекращению добычи нефти [1].

Особенно большое значение тепловые процессы приобретают при вводе в эксплуатацию скважин после ремонта подземного оборудования, а также при их переводе на новый квазистационарный режим работы [5,7,8]. В этих случаях термогидродинамические процессы в скважине и насосной установке нестационарны, и двигатель может длительное время работать в условиях перегрузки или недогрузки при его недостаточном охлаждении многофазным пластовым потоком. На этапе ввода скважины в эксплуатацию станция управления может многократно включать и выключать насосный агрегат для охлаждения двигателя.

Поэтому повышение надежности работы насосной установки и предотвращения работы ее двигателя в нерегламентированных температурных интервалах является актуальной задачей, для решения которой в статье применены методы математического и численного моделирования. Таким образом, настоящая работа посвящена исследованию нестационарных взаимосвязанных тепловых процессов в системе «ПЭД– трехфазный поток– горные породы» с использованием методов математического и численного моделирования. Отметим также, что результаты исследований ориентированы на их использование в киберфизических системах [7], предназначенных для компьютерного моделирования реальных технологических операций, выполняемых специалистами-нефтяниками.

1. Математическая модель

Как правило, температурный режим погружного электродвигателя рассчитывается для наиболее важных для практики нефтедобычи установившихся условий работы погружной установки [1]. В этом случае можно пренебречь инерционными эффектами, а для расчета теплообмена многофазного скважинного потока с горными породами использовать коэффициент нестационарного теплообмена, см., например, [8].

Однако при исследовании переходных процессов в системе «ПЭД– трехфазный поток – горные породы» необходимо учитывать временные температурные изменения в каждом из ее элементов. Для расчета взаимосвязанных нестационарных процессов теплопроводности в погружном электродвигателе и горных породах, а также конвективного теплопереноса в водонефтегазовом потоке, движущемся в кольцевом зазоре между ПЭД и внутренней поверхностью обсадной колонны, нами разработана математическая модель, которая включает в себя три блока уравнений.

Основным уравнением первого блока является уравнение нестационарного конвективного теплопереноса

(1)
$$V_a C_{\rho}^* \frac{\partial I}{\partial \tau} = -S_c \alpha_c \left(T - \theta_w\right) + S_m \alpha_m \left(T_m - T\right) - 2C_P^* \left(T - T_I\right),$$
$$C_{\rho}^* = \sum_{i=1}^3 \rho_i \varphi_i C_{Pi} + \frac{\rho_1 \varphi_1 L}{1 - C_s F} \frac{\partial \left(C_s F\right)}{\partial T},$$
$$C_P^* = \sum_{i=1}^3 G_i C_{Pi} + \frac{G_1 L}{1 - C_s F} \frac{\partial \left(C_s F\right)}{\partial T}.$$

Это уравнение описывает изменение средней температуры T(t) трехфазной смеси, движущейся со средней скоростью w к приему насоса по кольцевому зазору объемом V_a и площадью S_a между циллиндрическими боковыми поверхностями обсадной колонны и ПЭД радиусами R_c , R_m и площадями S_c , S_m соответственно.

Уравнение (1) получено в результате приближенного интегрирования одномерного уравнения энергии водонефтегазовой смеси [8–10] по длине кольцевого зазора. При этом предполагается, что в силу небольшой длины (~10 м) кольцевого участка обтекания смесь движется вдоль ПЭД с одинаковой скоростью всех фаз ($w_i = w$, i = 1, 2, 3) как квазиоднородная среда с эффективными свойствами (плотностью $\rho = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \rho_1 \varphi_3$, динамической вязкостью μ и т. д.) при заданных значениях массовых расходов фаз $G_i = \rho_i \varphi_i w S_a$, i=1,2,3, смеси $G = G_1 + G_2 + G_3$, давления P_I и температуры T_I на приеме двигателя в точке $z = z_I$. Здесь

t –время;

 $T_m(t)$ и $\theta(r,t)$ – температура двигателя и горных пород;

 $\left. \theta_{w}(t) = \theta\left(r,t \right) \right|_{r=R_{c}}$ – температура на стенке обсадной колонны;

- *α_c*, *α_m* местные коэффициенты теплоотдачи на стенке обсадной колонны и боковой поверхности двигателя;
- нижние индексы i = 1, 2, 3 обозначают параметры нефтяной, газовой и водяной фаз соответственно;
- ρ_i, φ_i, α_{Pi}, α_{Ti} u C_{pi} средние плотность, объемное расходное содержание, коэффициенты теплового расширения, объемной упругости и удельной изобарной теплоемкости *i*-й фазы;
- L скрытая теплота, затрачиваемая на фазовый переход растворенного в нефти газа в свободное состояние при снижении давления ниже давления $P_s(T)$ насыщения нефти газом, а также в обратном направлении при $P > P_s$.

Заметим, что при таких допущениях на участке кольцевого зазора изменение температуры и содержаний фаз определяется как тепловым взаимодействием смеси с двигателем и горными породами, так и скоростью ее движения в кольцевом зазоре, фазовыми переходами и тепловым расширением фаз. Давление P(z,t) во всех фазах одинаково и равно P_I .

Уравнение (1) энергии трехфазной смеси дополняется многочисленными соотношениями, которые позволяют рассчитать важнейшие характеристики отдельных фаз и смеси в целом, процесса разгазирова-

168

ния нефти, а также объемные концентрации фаз в потоке:

$$\begin{split} \rho_1 &= \frac{\rho_{1,R}\rho_{1,\partial}\left(1 - C_sF\right)\left[1 - \alpha_{P1}\left(T - T_R\right) + \alpha_{T1}\left(P - P_R\right)\right]}{\rho_{1,\partial}\left(1 - F\right) + \rho_{1,\partial}F\left(1 - C_s\right)\left[1 - \alpha_{P1}\left(T - T_0\right) + \alpha_{T1}\left(P_0 - P_R\right)\right]},\\ \rho_2 &= \frac{MP}{848gZ_{\Gamma}T}, \qquad \rho_3 = \rho_{3,R}\left[1 - \alpha_{P3}\left(T - T_R\right) + \alpha_{T3}\left(P - P_R\right)\right],\\ C_s &= \frac{\rho_2^0 V_0(T)}{\rho_{1,R}}, \qquad C = \frac{C_s(1 - F)}{1 - C_sF}, \qquad w = \frac{G}{\rho S_a},\\ \varphi_2 &= \frac{G_2 \rho_1 \rho_3}{\rho_3\left[\rho_1 G_2 + \rho_2\left(G - G_2\right)\right] + G_3 \rho_2\left(\rho_1 - \rho_3\right)},\\ \varphi_3 &= \frac{G_3\left(\rho_1\left(1 - \varphi_2\right) + \rho_2 \varphi_2\right)}{\rho_3\left(G - G_3\right) + \rho_1 G_3}, \qquad \varphi_1 = 1 - \varphi_2 - \varphi_3. \end{split}$$

Здесь

- $\rho_{1,\partial} \ u \ \rho_2^0$ плотность дегазированной нефти и газа при нормальных условиях ($P = P^0 = 0.1013$ МПа, T = 273 K);
- $\rho_{1,R} \ u \ \rho_{3,R}$ плотность нефти и воды при пластовых давлении P_R и температуре T_R ;
- F(P,T) обобщенный коэффициент растворимости газа в нефти, описывающий массообменные процессы между нефтью и газом, $F(P,T) = \Phi(P/P_s) + \delta_F(P/P_s) [T - T_R]$, где
 - $\Phi\left(P\right)-\;$ функция F(P,T) при характерном значении температуры $T=T_R$ и
 - $\delta_F(P)$ эмпирическая зависимость, построенные в [10] на основе обработки экспериментальных данных по разгазированию глубинных проб нефтей;
- $C_s \ u \ C$ массовые концентрации газа, растворенного в нефти в пластовых условиях (P_R, T_R) при $P_R > P_s(T_R)$ и в скважинном потоке при $P < P_s(T)$;
- $V_0(T)$ нормальный объем газа при температуре T, выделяющийся из раствора при достижении давления P = 0;
- *Z*_Г коэффициент сверхсжимаемости реального газа;
- М молекулярная масса газа (метана).

Полное описание всех полуэмпирических зависимостей, аппроксимационных формул и расчетных соотношений, необходимых для замыкания уравнения (1), можно найти в работах [7,8,10]. Второй блок содержит уравнение для средней температуры электродвигателя $T_m(t)$, обобщающее расчетную схему [1,2]. Это уравнение получено в предположении однородности материала и цилиндричности ПЭД в результате осреднения трехмерного уравнения теплопроводности с распределенным источником тепла, обусловленным потерями энергии при работе двигателя, и с учетом его теплообмена с обтекающим трехфазным потоком

(2)
$$C_m V_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = -S_m \alpha_m \left(T_m - T\right) + (1 - \eta_m) N_m, \quad t > 0.$$

Здесь C_m , N_m и η_m – коэффициент эффективной объемной теплоемкости материала ПЭД, потребляемая мощность и КПД двигателя, а V_m – объем ПЭД.

Третий блок уравнений описывает процесс радиальной теплопроводности в однородных горных породах, окружающих обсадную колонну скважины:

(3)
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right), \quad t > 0, \qquad R_c < r < \infty,$$

(4)
$$\theta \Big|_{r \to \infty} = T_0, \qquad -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R_c} = \alpha_c (T - \theta_w),$$

(5)
$$\theta(r,0) = T_0,$$
 $R_c < r < \infty,$ $T_m(0) = T(0) = T_0,$

где a, λ – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности пород и T_0 – заданное значение начальной температуры во всех элементах системы «ПЭД–скважина–горные породы».

Коэффициент теплоотдачи α_m на боковой поверхности двигателя определяется как функция $\alpha_m = 0.5Nu \cdot \lambda^*/(R_c - R_m)(R_c - R_m)$ числа Нуссельта $Nu = c \operatorname{Re}^m \operatorname{Pr}^n (\operatorname{Pr/Pr}_w)^{\kappa}$ по общепринятым полуэмпирическим формулам [11,12] для ламинарного и турбулентного потоков смеси в трубе, где $\operatorname{Re} = 2w(R_c - R_m)\rho/\mu$ и $\operatorname{Pr} = \mu C_P^*/\lambda^* -$ числа Рейнольдса и Прандтля; C_P^* и λ^* – коэффициенты эффективной теплоемкости и теплопроводности смеси. Эффективная вязкость μ дисперсного трехфазного потока рассчитывается с учетом ее зависимости от концентрации дисперсных фаз в водонефтегазовом потоке по формулам [8,10].

Для ламинарного течения Re < 2300: c = 0.15, m = 0.33, n = 0.43, $\kappa = 0.25$; для турбулентного течения Re > 10000: c = 0.021, m = 0.8, n = 0.43, $\kappa = 0.25$. При переходном режиме течения $Nu = K_0 (\text{Re}) \cdot \text{Pr}^{0.43} (\text{Pr}/\text{Pr}_w)^{0.25}$, где $K_0 (\text{Re}) = 6.1 \cdot 10^{-3} \text{Re} - 9.461$.

Коэффициент теплоотдачи α_c на боковой поверхности обсадной колонны вычисляется по аналогичным формулам.

Начальные и граничные условия (4)–(5) замыкают систему дифференциальных уравнений (1)–(3).

2. Численная модель и алгоритм

Полученная система уравнений (1)—(5) является нелинейной и решается численно. Введем узлы $t_{j+1} = t_j + h_{\tau}$ равномерной сетки с шагом h_{τ} вдоль оси t, j = 0, 1, 2... и аппроксимируем дифференциальные уравнения (1) и (2) по неявной схеме Эйлера с порядком $O(h_{\tau})$:

$$T^{j+1} = T^{j} + \frac{h_{\tau}}{V_{a}C_{\rho}^{*,j+1}} \Big[-S_{c}\alpha_{c}^{j+1} \left(T^{j+1} - \theta_{w}^{j+1}\right) + S_{m}\alpha_{m}^{j+1} \left(T_{m}^{j+1} - T^{j+1}\right) - 2C_{P}^{*,j+1} \left(T^{j+1} - T_{I}\right) \Big],$$
$$T_{m}^{j+1} = T_{m}^{j} + \frac{h_{\tau}}{C_{m}V_{m}} \left[-S_{m}\alpha_{m}^{j+1} \left(T_{m}^{j+1} - T^{j+1}\right) + (1 - \zeta_{m})N_{m} \right].$$

Для решения этой системы уравнений на каждом временном слое $[t_j, t_{j+1}]$ воспользуемся методом простой итерации:

(6)
$$T^{s+1} = T^{j} + \frac{h_{\tau}}{V_{a}C_{\rho}^{*,s}} \left[-S_{c}\alpha_{c}^{s} \left(T^{s} - \theta_{w}^{s}\right) + S_{m}\alpha_{m}^{s} \left(T_{m}^{s+1} - T^{s}\right) - 2C_{P}^{*,s} \left(T^{s} - T_{I}\right) \right],$$

(7)
$$T_{m}^{s+1} = T_{m}^{j} + \frac{h_{\tau}}{C_{m}V_{m}} \left[-S_{m}\alpha_{m}^{s} \left(T_{m}^{s} - T^{s}\right) + (1 - \eta_{m})N_{m} \right]$$

где s-номер итерации, $s=0,1,2\ldots$ В качестве нулевого приближения при s=0зададим значения функций $T^{s=0}=T^j,\,T^{s=0}_m=T^j_m$ и $T^{s=0}_w=T^j_w$ с предыдущего временного слоя t_j . Критерием окончания итерационного процесса на некотором шаге s=Sявляется условие $s=S\max\left\{\left|T^{S+1}_m-T^S_m\right|,\left|T^{S+1}-T^S\right|\right\}<\varepsilon$, где ε -заданная точность. При достижении этого условия искомые функции T^{j+1} и T^{j+1}_m определяются значениями T^{S+1} и T^{S+1}_m на последнем итерационном шаге.

Решение уравнения теплопроводности (3) находится методом конечных разностей. Преобразуем предварительно уравнения (3), (4), перейдя к логарифмической системе координат $\zeta = \ln(r/R_c), r = R_c e^{\zeta}$. Нетрудно показать, что эти уравнения примут вид

(8)
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{a}{R_c^2} \cdot e^{-2\zeta} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2}, \qquad 0 < \zeta < \infty, \qquad t > 0,$$

(9)
$$-\lambda \frac{1}{R_c} \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=0} = \alpha_c \left(T - \theta_w\right), \quad \theta|_{\zeta \to \infty} = T_0, \quad \theta(\zeta, t)|_{t=0} = T_0,$$

где $\theta_w(t) \equiv \theta_{\zeta=0}(t).$

Приближенное решение поставленной задачи будем искать в конечной области $\zeta \in [0, \overline{\zeta}]$, где значение $\overline{\zeta} = \ln(\overline{R}/R_c)$ соответствует достаточно большому расстоянию \overline{R} от стенки обсадной колонны, на котором практически отсутствует влияние тепловых возмущений на начальную температуру пород, т. е. $\theta_{\zeta=\overline{\zeta}}(t) \approx T_0$.

Для аппроксимации уравнения (8) и граничного условия 2-го рода (9) введем узлы $\zeta_i = i \cdot h$ равномерной пространственной сетки с шагом $h = \overline{\zeta}/N$, где N-заданное число узлов, $i = \overline{0, N}$, и те же самые узлы временной сетки $\{t_j\}$ с постоянным шагом h_{τ} . Запишем разностную схему, аппроксимирующую эти уравнения в узлах $\{t_j, \zeta_i\}$ сетки с порядком $O(h_{\tau} + h^2)$:

(10)
$$\theta_{i+1}^{j+1} - (2 + A_i)\theta_i^{j+1} + \theta_{i-1}^{j+1} = -A_i\theta_i^j, \quad i = \overline{1, N-1},$$

(11)
$$\theta_1^{j+1} = \theta_0^{j+1} - h \frac{R_c \alpha_c^{j+1}}{\lambda} \left(T^{j+1} - \theta_0^{j+1} \right) + \frac{h^2}{2} \frac{R_c^2}{a} \frac{\theta_0^{j+1} - \theta_0^j}{h_\tau}, \\ \theta_N^{j+1} = T_0, \qquad \theta_i^0 = T_0, \qquad i = \overline{0, N},$$

где $A_i = h^2 R_c^2 e^{2\zeta_i} / (h_\tau a), \quad \theta_0^{j+1} = \theta_w (t_{j+1}).$

Систему алгебраических уравнений (10)-(11) с трехдиагональной матрицей решаем методом прогонки, если задано значение температуры смеси T^{j+1} . При реализации общего итерационного процесса это значение определяется величиной T^{S+1} . Численная модель реализована в компьютерном приложении, позволяющем проводить многопараметрические вычислительные эксперименты с целью изучения температурных зависимостей и различных тепловых эффектов в скважине, ПЭД и горных породах наряду с одновременной визуализацией результатов расчетов. С помощью разработанной программы методом вычислительного эксперимента изучена устойчивость и сходимость разностных схем, что позволило выбрать оптимальные шаги сетки для обеспечения необходимой точности расчетов. Дано количественное и качественное

172

сравнение температурных процессов при использовании двух различных подходов к расчету взаимодействия потока и горных пород, в одном из которых используется решение указанной выше задачи (3)–(5), а в другом – коэффициент нестационарного теплообмена, полученный на основе асимптотического исследования ее решения. Показано, что в обоих случаях незначительное различие между результатами расчетов имеет место лишь при малых временах, а при больших временах на квазистационарном режиме оно практически исчезает.

3. Результаты вычислительных экспериментов

Рассмотрим в качестве примера наиболее интересный с практической точки зрения случай температурных процессов, которые возникают при отключении двигателя в нефтяной скважине, когда его температура T_m в результате нагрева достигает предельного значения $130^{\circ}C$, и при повторном его включении после завершения периода охлаждения ПЭД восстанавливается до первоначальной температуры обтекающей смеси $T_I = 30^{\circ}C$. При расчетах значение давления на приеме двигателя $P_I=5$ МПа задавалось ниже давления насыщения $P_s=10$ МПа, так что в потоке, обтекающем ПЭД, присутствует свободный газ. Обводненность смеси равна 0.5, суммарный расход смеси $G = 100 \text{ м}^3/\text{сут}$, мощность ПЭД, его радиус и длина равны 90 кВт, 0.06 м и 12 м соответственно. Значения многочисленных параметров фаз и расчетные полуэмпирические зависимости модели (1)–(5) аналогичны [8,10]. Результаты расчётов для одного из периодов работы и охлаждения ПЭД представлены на рисунке 1.

Как видно на рисунке 1a, с момента t = 0 включения двигателя происходит рост его температуры T_m и температуры T водонефтегазовой смеси, движущейся в кольцевом зазоре. Примерно через два часа в результате нагрева двигателя температура T_m достигает максимально допустимого значения, и станция управления отключает двигатель. После этого начинается его охлаждение обтекающим потоком смеси. Продолжительность этой стадии составляет около часа. За это время происходит постепенное выравнивание температуры двигателя и температуры трехфазной смеси. После охлаждения двигателя его работа может возобновляться.

Рисунок 16 иллюстрирует временные изменения температурных профилей и глубины проникновения температурных возмущений



Рисунок 1. Результаты расчетов температурных возмущений в горных породах

в горных породах. С момента до момента отключения ПЭД температура горных пород и глубина их прогрева возрастают, достигая максимальных значений к моменту отключения двигателя. На стадии охлаждения происходит постепенное снижение температуры $\theta(\zeta, t)$, которое в силу инерции процесса теплопроводности значительно запаздывает во времени по сравнению с конвективными изменениями температуры смеси в кольцевом зазоре.

Отметим, что характер временной зависимости температуры двигателя и продолжительность стадий охлаждения и нагрева ПЭД после его отключения и повторного включения (десятки минут) согласуются с промысловыми результатами измерений, а также аналогичными расчетами этих процессов в нефтяных скважинах, представленными в [4,5].

Заключение

Разработаны математическая модель, алгоритмы и программное обеспечение для расчета нестационарных тепловых процессов, протекающих в системе «ПЭД–трехфазный поток–горные породы». На основе вычислительных экспериментов выполнены численные исследования сходимости и устойчивости численного решения задачи, а также особенностей нестационарных тепловых процессов, возникающих в погружном двигателе в практике вывода нефтяной скважины на эксплуатационный режим. Показана высокая производительность расчетов с использованием разработанного программного обеспечения. Полученные результаты использованы в компьютерной кибер-физической системе, предназначенной для моделирования и прогноза реальных технологических процессов нефтедобычи, а также обучения специалистов нефтяной отрасли. На основе анализа результатов расчетов, выполненных при различных условиях на приеме погружных двигателей различных типов, показано также, что:

- увеличение доли воды в потоке, обтекающем двигатель, влечет снижение температуры нагрева двигателя, а появление газа в смеси при работе ПЭД в условиях ниже давления разгазирования нефти, напротив, приводит к отрицательному эффекту – снижению охлаждающей способности трехфазного потока и росту температуры двигателя;
- глубина проникновения температурных возмущений при нагреве горных пород трехфазной смесью зависит от характеристик ПЭД, состава смеси и ее расхода. При неизменных условиях решения задачи со временем темп нагрева постепенно стабилизируется, а при больших временах тепловой процесс выходит на квазистационарный режим;
- применение ПЭД большой мощности приводит к значительному его нагреву и при недостаточной скорости охлаждающего трехфазного потока может привести к перегреву двигателя и его отключению контроллером наземной станции управления;
- переходные тепловые процессы, возникающие в рассматриваемой взаимосвязанной системе «ПЭД-трехфазный поток-горные породы» при отключении двигателя из-за его нагрева до максимально допустимой температуры, зависят от параметров каждого из элементов этой системы и характеризуются нетривиальным характером температурных профилей в горных породах. Расчетные оценки продолжительности стадий охлаждения ПЭД после его отключения и его нагрева при повторном включении (десятки минут) соответствуют реальным временам этих процессов в нефтяных скважинах.

Список литературы

- [1] Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти.– М.: Нефть и газ.– 2007.– ISBN 978-5-7246-0404-8.– 826 с. ↑166, 167, 170
- [2] Мищенко И. Т., Кокорев В. И., Мальцев Н. В. Методика расчета характеристик УЭЦН при перекачке вязких газожидкостных смесей (продолжение) // Нефть, газ и бизнес.- 2013.- № 1.- с. 62-65. ** ↑166, 170
- [3] Шишков С. А., Люстрицкий В. М. Тепловой режим работы установки УЭЦН // Нефтепромысловое дело.– 1997.– № 11.– с. 16–18. ^{↑166}
- [4] Пошвин Е. В. Термостойкий погружной электродвигатель // Бурение и нефть.- 2011.- № 11.- с. 42-45. № 11.6, 174
- [5] Мельниченко В.Е. Моделирование неустановившегося процесса теплообмена системы «ПЭД – скважина» // Территория Нефтегаз.– 2013.– № 2.– с. 60–63. *↑166, 174
- [6] Язьков А. В., Росляк А. Т., Арбузов В. Н. Моделирование процесса теплообмена между трехфазным флюидом и погружным электродвигателем // Нефтепромысловое дело.– 2007.– № 10.– с. 27–34. * ↑166
- [7] Konyukhov I., Konyukhov V. Cyber-physical system for control the heat and mass transfer in the oil reservoir and producing pumping well // Cybernetics and Physics. - 2019. - Vol. 8. - No. 3. - pp. 137-142. K in f166, 167, 169
- [8] Саламатин А. Н. Математические модели дисперсных потоков.- Казань: Издательство Казанского университета.- 1987.- 172 с. [↑]166, 167, 168, 169, 170, 173
- [9] Bratland O. Pipe Flow 2: Multiphase Flow Assurance. 354 pp. URI 168
- [10] Конюхов В. М. Дисперсные потоки в нефтяных скважинах.- Казань: Издательство Казанского университета.- 1990.- 137 с. ↑168, 169, 170, 173
- [11] Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена.- М.: Атомиздат.- 1979.-416 с. [↑]170
- [12] Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие.- М.: Энергоатомиздат.- 1990.- ISBN 5-283-00061-3.-368 с. ↑170

 Поступила в редакцию
 18.06.2022;

 одобрена после рецензирования
 12.08.2022;

 принята к публикации
 28.09.2022.

Рекомендовал к публикации

д.ф.-м.н. А. М. Елизаров

Информация об авторах:



Владимир Михайлович Конюхов

д.ф.-м.н., профессор кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта Института вычислительной математики и информационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета. Область научных интересов – механика многофазных сред, двухфазная фильтрация, математическое моделирование, численные методы, высокопроизводительные вычисления

 0000-0003-0569-2029

 e-mail:
 vladimir.konyukhov@kpfu.ru

Иван Владимирович Конюхов



к.ф.-м.н., доцент Лаборатории анализа данных и машинного обучения в нефтегазовой отрасли АНО ВО «Университет Иннополис». Область научных интересов – математическое моделирование, высокопроизводительные вычисления, программирование

> (D) 0000-0002-9637-4255 e-mail: i.konyukhov@innopolis.ru

Альбина Рамиловна Ганиева



магистрант кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта Института вычислительной математики и информационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета. Область научных интересов – математическое моделирование, многофазные течения, программирование

 Image: 0000-0002-5901-8219

 e-mail:
 albina.ganieva2014@yandex.ru

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.