УДК 622.245

Е.Е.МЕЛЬНИКОВА
Аспирантка кафедры электротехники и электромеханики

ЗАБОЙНЫЙ ЭЛЕКТРОДНЫЙ ТЕПЛОПАРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДОБЫЧИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

Рассмотрены процессы в забойном теплопарогенераторе с коаксиальным расположением электродов. Получены расчетные соотношения для определения сопротивления рабочей жидкости, парового и жидкостного объемов при заданных электрической мощности и тепловом потоке нагревателя.

The processes in face heat-generator with a coaxial electrodes geometry are reviewed. The computational ratio for definition of resistance to working fluid, steam and liquid volumes are obtained at given electrical power and given heat flow of the heater.

Основной причиной, ограничивающей рост добычи нефти в России, является не физическое истощение недр, а значительное усложнение природных условий поисков, разведки и разработки месторождений. Разработкой и внедрением методов повышения нефтеотдачи пластов активно занимаются все нефтедобывающие страны, так как увеличение нефтеотдачи на эксплуатируемых месторождениях равносильно открытию новых. В России, по оценкам, имеется около 10 млрд м^3 промышленных запасов тяжелых нефтей высокой вязкости, освоение которых до настоящего времени не нашло широкого распространения и преимущественно осуществляется на двух месторождениях – Усинском (Республика Коми) и Гремихинском (Удмуртская Республика). Несмотря на энергоемкость разработки залежей тяжелых нефтей, востребованность данного сырья в перспективе будет возрастать, что, в свою очередь, требует поиска оптимальных путей их освоения. В связи с этим актуальными являются анализ и обобщение опыта внедрения технологий, обеспечивающих рентабельность добычи высоковязких нефтей [1].

Мировой опыт разработки залежей высоковязких нефтей показал, что нет альтернативы термическим методам воздействия на пласт. В отечественной практике преимущественно используется вытеснение ее паром [1]. Перспективным направлением развития термических методов добычи является разработка забойных теплогенераторов [5]. Одной из основных задач при проектировании скважинных нагревателей является выбор геометрических параметров устройства и физических свойств рабочей жидкости в зависимости от условий теплового нагружения пласта. Электродные жидкостные нагреватели достаточно широко применяются в промышленных электрокотлах (паровых и водогрейных). Однако, чтобы использовать подобные нагреватели в скважинах, необходимы конструктивные изменения.

Рассмотрим тепловой расчет устройства тепловой обработки скважины с коаксиальным расположением электродов (рис.1, *а*). В таком теплогенераторе благодаря интенсификации теплообмена за счет создания конвективного контура с малым гидравлическим сопротивлением достигается эффективное преобразование электрической энергии в теплоту. Отличительной особенностью рассматриваемого теплогенератора является простота конструкции изготовления, монтажа и эксплуатации [5].

Для определения электрического сопротивления R проводящей жидкости в устройстве тепловой обработки призабойной зоны

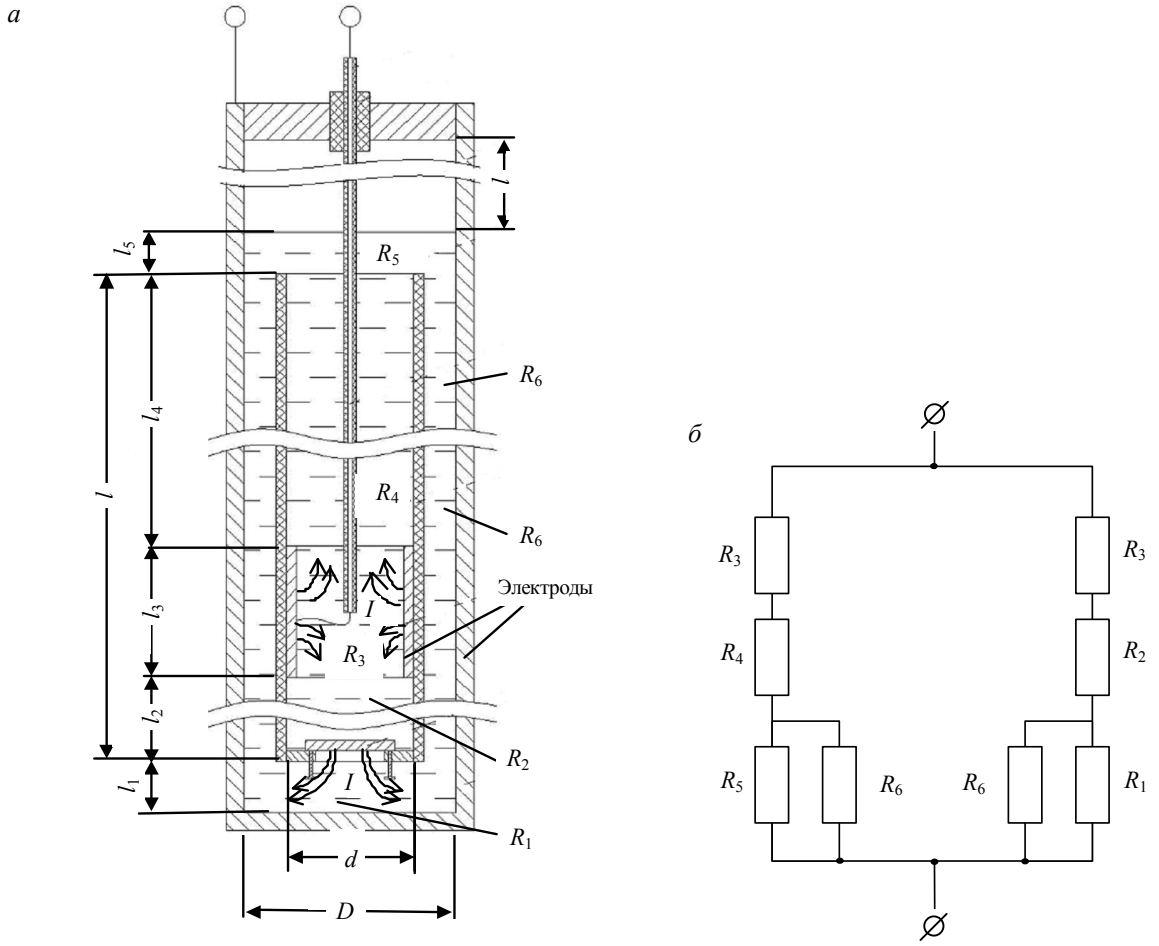


Рис.1. Расчетная схема забойного теплогенератора с коаксиальным расположением электродов: *а* – конструктивная схема; *б* – электрическая

скважины воспользуемся методом сечений Релея [3], который оказался наиболее плодотворным среди множества аналитических методов расчета.

В этом случае кусочно-составная зона проводимости разбивается вспомогательными бесконечно тонкими поверхностями, одни из которых изопотенциальны, а другие непроницаемы для линий тока. Такое дробление позволяет линеаризовать исходное потенциальное поле, что существенно упрощает решение задачи. Схема соединения сопротивлений представлена на рис.1, *б*.

Выражения для сопротивлений отдельных участков R_i будут выглядеть следующим образом:

$$R_2 = \frac{4\rho l_2}{\pi d^2},\ R_3 = \frac{2\rho l_3}{\pi d^2},\ R_4 = \frac{4\rho l_4}{\pi d^2},$$

$$R_5 = \frac{4\rho l_5}{\pi d^2} + \frac{\rho}{2\pi l_5}\ln\frac{D}{d},$$

$$R_1^{(a)} = \frac{4\rho l_1}{\pi D^2},\ R_1^{(n)} = \left[\left(\frac{4\rho l_1}{\pi d^2}\right)^{-1} + \left(\frac{\rho}{2\pi l_1}\ln\frac{D}{d}\right)^{-1}\right]^{-1} =$$

$$= \frac{\rho}{\pi}\left(\frac{1}{\frac{d^2}{4l_1} + 2l_1(\ln\frac{D}{d})^{-1}}\right), \qquad (1)$$

$$R_6^{(a)} = \frac{2\rho l}{\pi(D^2 - d^2)},\ R_6^{(n)} = \frac{\rho}{\pi l}\ln\frac{D}{d},$$

где ρ – электрическое сопротивление рабочей жидкости; l – высота устройства; d – внутренний диаметр устройства; D – внутренний диаметр обсадной колонны.

В связи с тем, что при расчете R_1 и R_6 учитывалось как адиабатное дробление участка, так и изопотенциальное дробление, целесообразно использовать комбинированное дробление, в результате чего значения R_1 и R_6 будут наиболее близки к истинным [4]:

$$R_1 = \frac{R_1^{(a)} + R_1^u}{2},\ R_6 = \frac{R_6^{(a)} + R_6^u}{2}. \qquad (2)$$

В итоге получаем

$$R_1 = \frac{S}{2\pi}\left[\frac{l_1}{D^2} + \frac{1}{\frac{d^2}{4l_1} + 2l_1\left[\ln\frac{D}{d}\right]^{-1}}\right], \qquad (3)$$

$$R_6 = \frac{S}{2\pi}\left[\frac{2l^2}{D^2 - d^2} + \ln\frac{D}{d}\right]. \qquad (4)$$

Полное сопротивление проводящей фазы, исходя из схемы соединения (рис.1, *б*), можно определить по формуле

$$R = \left[\left(R_3 + R_4 + \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}\right)^{-1} + \left(R_3 + R_2 + \frac{R_1 R_6}{R_1 + R_6}\right)^{-1}\right]^{-1}.$$

С учетом того, что $R_2 = R_4$, получаем

$$R = \left[\left(R_2 + R_3 + \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}\right)^{-1} + \left(R_2 + R_2 + \frac{R_1 R_6}{R_1 + R_6}\right)^{-1}\right]^{-1}. \qquad (5)$$

Мощность нагрева N с учетом ограничения со стороны кабельных линий примем равной 0,5 МВт. Диаметр устройства D в соответствии с диаметром обсадной трубы в зоне продуктивного пласта равен 0,127 м. Напряжение питания $U = 6$ кВ.

Запишем уравнение теплового баланса для устройства тепловой обработки. С одной стороны, полная мощность, рассеиваемая с поверхности нагревателя, равна

$$Q = (\pi D(l_{æ} + l_{ï}) + \pi D^2) q_{ï} = \pi D q_{ï} (l_{æ} + l_{ï} + D), \qquad (6)$$

где $q_{ï}$ – удельная мощность теплового потока; $l_{æ}$ – длина участка, заполненного жидкостью; $l_{ï}$ – длина участка, заполненного паром.

С другой стороны, мощность, выделяемую в проводящей зоне при протекании по ней электрического тока, можно определить по формуле

$$N = U^2/R. \qquad (7)$$

Приравнивая Q к N, и задаваясь геометрическими параметрами, можно найти удельное электрическое сопротивление рабочей жидкости ρ, необходимое для поддержания нормального режима работы нагревательного устройства.

Соотношение длин жидкостной и паровой фаз $l_{æ}$ и $l_{ï}$ определим из следующих соображений. Для получения заданной мощности при нормальном напряжении необходимо обеспечить требуемое соотношение между объемами пара и воды в нагревательном устройстве, которые определяются температурой и давлением в замкнутом объеме. Для изохорного процесса нагрева воды можно записать уравнение постоянства объема нагревателя

$$V = \gamma_{ï} x + \gamma_{â}(m_{o} - x), \qquad (8)$$

где x – масса пара при заданных температуре и давлении; m_{o} – масса воды в нагревателе при 20 °С; $\gamma_{ï}$ и $\gamma_{â}$ – удельные объемы пара и воды при заданной температуре соответственно.

Из (8) находим

$$x = \frac{V - m_{o}\gamma_{ï}}{\gamma_{ï} - \gamma_{â}}. \qquad (9)$$

По таблицам состояния «вода-пар» [2] для различных значений температур и давлений определяется масса пара x при заданных объеме нагревателя и массе залитой в него воды. По полученному значению x определяются: объем пара в нагревателе

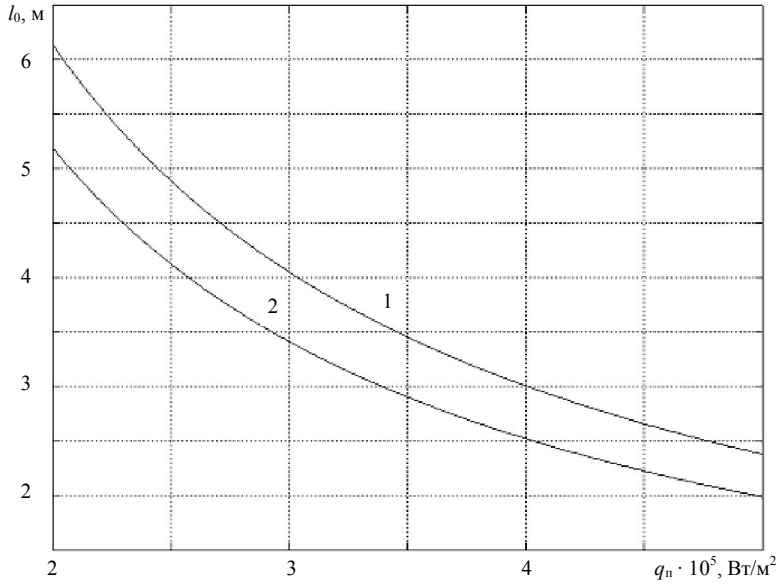


Рис.2. Зависимость длины нагревателя от плотности теплового потока при D = 0,127 м (1), D = 0,140 м (2)

$V_п = \gamma_п x$, объем воды $V_в = V - V_п$, высота столба пара $l_п = 4V_п / \pi D^2$.

Зная $l_п$, находим высоту столба жидкости

$$l_ж = l_o - l_п . \qquad (10)$$

Максимальное значение плотности теплового потока $q_п$, рассеиваемого в пласт при кипении и конденсации, достигает значений $5 \cdot 10^5$ Вт/м^2. На рис.2 представлены зависимости длины нагревателя l_0 от плотности теплового потока при различных значениях диаметра нагревателя. Определим по формуле (5) с учетом (1) электрическое сопротивление рабочей жидкости ρ, необходимое для поддержания нормального режима работы нагревательного устройства, при этом электрические сопротивления отдельных участков нагревательного устройства определяются по формулам (1)-(4). В результате получаем ρ λ 3 Ом·м. Расчет проводился при следующих значениях параметров: $l_0 = 2{,}5$ ì ; $U = 6$ êÂ ; $N = 500$ êÂò ; $D = 0{,}127$ ì ; $d = 0{,}089$ ì ; $l_1 = l_2 = l_4 = l_5 = 0{,}225$ ì ; $l_3 = 0{,}1$ ì .

Применение в регионах с высокой электровооруженностью скважинного электротермического оборудования позволит снизить стоимость термических скважин, автоматизировать процесс термообработки, за счет высокой маневренности увеличить число добычных скважин и получить экологически чистые и ресурсосберегающие технологии термической добычи тяжелых высоковязких нефтей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Артеменко А.* Приоритет – за пароцикликой / А.Артеменко, В.Кащавцев // Нефть России. 2005. № 10.

2. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963.

3. *Дульнев Г.Н.* Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н.Дульнев, Ю.П.Заричняк. Л.: Энергия, 1974.

4. *Дульнев Г.Н.* Эффективный коэффициент систем с взаимопроникающей проводимостью / Г.Н.Дульнев, В.В.Новиков // Инженерно-физический журнал. 1977. Т.33. № 2.

5. *Загривный Э.А.* Электротермический комплекс на основе скважинного электродного нагревателя мощностью более 500 кВт для теплового воздействия на продуктивный пласт высоковязкой нефти / Э.А.Загривный, А.Е.Козярук, С.Н.Батаев // Электротехника. 2003. № 5.

Научный руководитель д-р т. н. проф. *Э.А.Загривный*