УДК 642.245

Э.А.ЗАГРИВНЫЙ, *д-р техн. наук, профессор, zagrivniy@yandex.ru*
В.О.ЗЫРИН, *аспирант, zyrinviacheslav@gmail.com*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

E.A.ZAGRIVNIY, *Dr. in eng. sc., professor, zagrivniy@yandex.ru*
V.O.ZYRIN, *post-graduate student, zyrinviacheslav@gmail.com*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПАРОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТЫ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

Приведены результаты разработки алгоритма расчета и программы вычисления значений основных параметров забойного электропарогенератора для теплового воздействия на пласты высоковязкой нефти. Приведен пример определения параметров для условий Усинского месторождения.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, алгоритм расчета, программа расчета, электропарогенератор, нефтедобыча.

ALGORITHM AND CHARACTERIZATION PROGRAM OF DOWNHOLE ELECTROSTEAMGENERATOR FOR HEAT TREATMENT ON HIGH VISCOSITY OIL RECERVOIRS

In paper are shown the results of creation calculation algorithm and calculation main parameters for downhole electrosteamgeneratos for heat treatment of high-viscosity oil reservoirs. The example of characterization results for Usinskoye oil field.

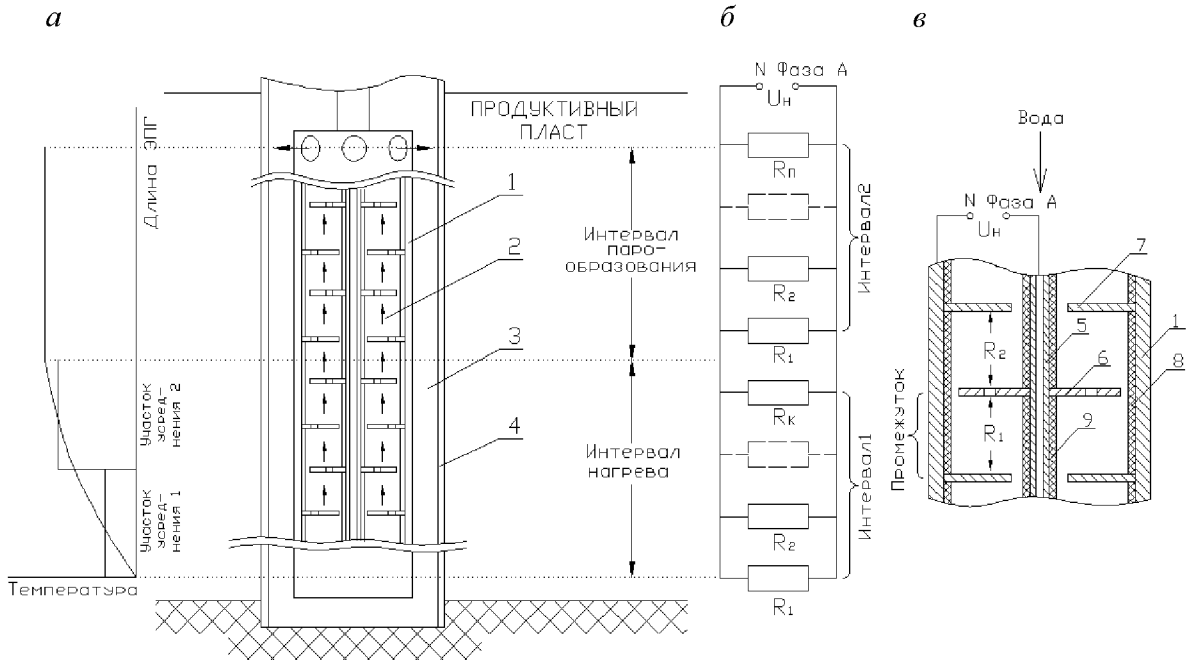
Key words: high viscosity oil, characterization algorithm, calculation program, electrosteamgenerator.

Последние четыре десятилетия (1965-2000 гг.) в стране наблюдается негативная тенденция падения нефтеотдачи (с 48 до 34 %), что равноценно снижению извлекаемых запасов на 14 млрд т (за всю историю нефтяной промышленности России с 1864 г. добыто 15,6 млрд т) [1,2].

В этих условиях особую важность приобретает рациональное освоение широко распространенных залежей тяжелых высоковязких нефтей (ВВН), мировые запасы которых приблизительно в семь раз превышают запасы легких нефтей (более 700 млрд т).

Безальтернативными методами нефтеотдачи отечественными и зарубежными специалистами признаны термические методы (ТМ) воздействия на продуктивные пласты ВВН. В Горном университете на кафедре электротехники, электроэнергетики, электромеханики разработаны различные конструкции забойных электродных электронагревателей и электропарогенераторов [3, 4], на основе которых спроектирован электротермический комплекс для теплового воздействия на продуктивные пласты (см. рисунок).

В состав электротермического комплекса включены: устройство тепловой обработки призабойной зоны, насос с регулируемым электроприводом, емкость с котловой водой, насосно-компрессорные трубы (НКТ), маслозаполненнное вводное устройство, водоподающий узел с обратным клапаном [5].



Электропарогенератор: *а* – конструктивная схема; *б* – расчетная схема; *в* – элемент ЭПГ

1 – корпус ЭПГ; 2 – котловая вода; 3 – скважинная жидкость; 4 – эксплуатационная колонна; 5 – токовод; 6 – фазный дисковый электрод; 7 – нулевой дисковый электрод; 8 – корпусный изолятор; 9 – изолятор токовода

Исходными данными для определения основных термодинамических и конструктивных параметров ЭПГ являются: тип погружной кабельной линии, напряжение питания ЭПГ, диаметр ЭПГ, глубина установки ЭПГ, давление нагнетания пара в пласт, зависимость удельного сопротивления котловой воды от температуры $\rho = f(T)$.

В расчетах весь корпус ЭПГ условно разделен на два интервала – нагрев воды до температуры кипения в пластовых условиях и парообразование при температуре кипения.

Вычисление заданных параметров выполняется в следующей последовательности.

По заданному давлению нагнетания пара, равному давлению внутри ЭПГ, по таблицам состояния «вода – пар» определяется удельная энергия нагрева воды до кипения при этом давлении $W_к$ (кДж/кг) и парообразования $W_п$ (кДж/кг). Определяется плотность рабочей жидкости при температуре кипения.

Определяются коэффициенты долевого распределения удельной энергии на нагрев до температуры кипения и на производство пара

$$k_к = \frac{W_к - W_0}{W_п}; k_п = \frac{W_п - W_к}{W_п},$$

где W_0 – энергия воды на входе в ЭПГ.

Определяется номинальная мощность на интервале нагрева воды до кипения $P_к = k_к P_н$ и мощность на интервале парообразования $P_п = k_п P_н$.

По номинальной мощности ЭПГ и заданной степени сухости пара x определяется часовая паропроизводительность ЭПГ

$$Q = P_н \frac{3600}{W_к + x(W_п - W_к)}.$$

По диаметру обсадных труб принимается наружный диаметр ЭПГ. По толщине стенки корпуса δ_1, толщине изоляции внутреннего корпуса δ_2 определяется внутренний диаметр ЭПГ

$$D_{\text{вн}} = D - 2(\delta_1 + \delta_2).$$

По внутреннему диаметру токовода, толщине изоляции определяется диаметр токовода в изоляции $d_{\text{т}}$. Определяется площадь проточной части ЭПГ

$$S = \frac{\pi(D_{\text{вн}}^2 - d_{\text{т}}^2)}{4}.$$

Принимается межэлектродное расстояние по рекомендациям для промышленных электродов l_7, но не менее 100 мм при напряжении питания 6 кВ, и мощность на последнем межэлектродном промежутке инетрвала нагрева. Определяется сопротивление межэлектродного интервала

$$R_0 = \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{\text{э}}}.$$

Рассчитывается площадь электрода

$$S_{\text{э}} = \frac{l_{\text{э}}\rho}{R_0},$$

где ρ – удельное сопротивление при температуре кипения.

Для предотвращения процесса электролиза плотность тока на электродах j должна быть меньше 2 А/см^2. Проводится проверка рассчитаной площади на это условие:

$$j = \frac{I_{\text{н}}}{S_{\text{э}}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_0 S_{\text{э}}} < 2 \text{ А/см}^2.$$

Производится расчет числа межэлектродных интервалов для участка нагрева до температуры кипения. При отсутствии усредненной кривой зависимости $\rho = f(T)$ и возможности значительного увеличения площади электродов от расчетного значения на входе ЭПГ для результатов первого приближения принимается среднее сопротивление интервала $1\rho_{\text{ср}}$ и большая площадь электрода S_7. Определяется среднее сопротивление межэлектродного промежутка

$$R_{\text{ср}_1} = \rho_{\text{ср}} \frac{l_{\text{э}}}{S_{\text{э}}}.$$

Средняя мощность интервала

$$P_{\text{ср}_{\text{э}}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{R_{\text{ср}_1}}.$$

Число промежутков на интервале нагрева до температуры кипения

$$n = \frac{P_{\text{к}}}{P_{\text{ср}_{\text{э}}}}.$$

Определяется число промежутков на интервале парообразования.

На первом электроде интервала парообразования вода нагрета до температуры кипения и на этом электроде происходит зарождение пузырьков пара. Удельное сопротивление воды на интервале уменьшается за счет образования паровой фазы. Уменьшение сечения токопроводящих участков на интервале парообразования учитывается коэффициентом сужения сечения

$$S^*_{\text{ср}_1} = \frac{S_{\text{ср}_1}}{S} = \frac{1}{\frac{P_0}{Qr} + 1} = k, \qquad (1)$$

где k – коэффициент сужения сечения, таким образом $S_{\text{ср}} = kS$.

Коэффициент k всегда меньше единицы и определяет площадь среднего сечения токопроводящей жидкости на i-м участке между электродами на интервале парообразования в долях от номинального сечения S парогенератора. Относительное номинальное среднее значение площади сечения токопроводящей жидкости может быть выражено в долях или процентах от номинальной площади для n-го участка:

$$S_{\text{ср}_n} = k^n S. \qquad (2)$$

Мощность на интервале парообразования

$$P_{\text{п}} = k_{\text{п}} P_{\text{н}} = U^2 g_{\Sigma} = U^2 \left(\frac{S_{\text{ср}_1}}{\rho l} + \frac{S_{\text{ср}_2}}{\rho l} + \ldots + \frac{S_{\text{ср}\,n}}{\rho l}\right) =$$
$$= P_0(k + k^2 + k^3 + \ldots + k^n). \qquad (3)$$

Тогда эквивалентная проводимость:

$$g_{\Sigma} = \frac{P_{\text{п}}}{U^2} = \frac{S}{\rho l}(k + k^2 + k^3 + \ldots + k^n) =$$
$$= g_0(k + k^2 + k^3 + \ldots + k^n), \qquad (4)$$

где g_0 – проводимость воды между электродами на первом участке с температурой кипения при заданном давлении.

Скорость движения пароводяной смеси можно определить по формуле

$$v = \frac{Q}{S}. \qquad (5)$$

Для автоматизации процесса расчета параметров ЭПГ была создана имитационная модель программы расчета, написанная на языке С++.Расчет параметров ведется в указанной последовательности. Основой расчета числа межэлектродных интервалов на участке парообразования служит цикл.

В основе цикла расчета числа межэлектродных промежутков на интервале парообразования лежит факт уменьшения проводимости в геометрической прогрессии на интервалах парообразования по направлению движения жидкости в соотетствии с уменьшением среднего сечения токопроводящей жидкости.

В программе учитывается также скорость движения пара и воды в зависимости от расхода питающей воды и производительности электропарогенератора Q.

Скорость пара рассчитана с учетом скорости скольжения, т.е. величины, показывающей, на сколько пар движется быстрее, чем вода в вертикальном направлении. Возможны два условия выполнения цикла – уменьшение удельной проводимости до минимального значения, находящегося в пределах погрешности, и выработка суммарной проводимости, рассчитанной в теле цикла, на интервале парообразования. В цикле также ведется расчет времени прохода пара через все электроды промежутка, производительности на каждом участке.

С нарастанием паросодержания по высоте канала уменьшается плотность пароводяного потока и возрастает скорость его движения. Этот факт учитывается в программе введением 5 %-ного увеличения скорости движения на каждом интервале. Проведен расчет параметров забойного электропарогенератора для условий Усинского месторождения.

Исходные данные, вводимые с клавиатуры:

- Удельная проводимость ρ = 500 Ом·см.
- Энергия нагрева воды до кипения $W_к$ = 1501 кДж/кг.
- Теплота парообразования r = 1179 кДж/кг.
- Мощность ЭПГ P =2000 кВт.
- Напряжение питания U = 6 кВ.
- Принятая мощность на межэлектродном расстоянии $P_о$ =90 кВт.
- Межэлектродное расстояние $l_э$ =100 мм.
- Диаметр корпуса ЭПГ D =127 мм.

Результаты моделирования:

- Ток погружной линии I = 333 А.
- Мощности на интервалах нагрева и парообразования соответственно $P_к$ = 1120 кВт, $P_р$ = 879,8 кВт.
- Производительность ЭПГ Q = 2,686 м^3/ч.
- Параметры электрода S = 12,5 см^2, j = 1,2 А/см^2 < 2.
- Внутренний диаметр ЭПГ и площадь проточной части соответственно $D_{вн}$ = 95 мм, $S_{пр}$ = 58,3 см^2.
- Число электродов на интервале нагрева n_1 = 10.
- Скорость движения v = 460 м/ч.
- Коэффициент сужения сечения k = 0,92.
- Число электродов на интервале парообразования n_2 = 21, паропроизводительность Q = 2,48 м^3/ч.

Условием для работы цикла выбрана выработка суммарной проводимости на интервале парообразования.

Из расчета видно, что расчетное количество интервалов парообразования обеспечивает паропроизводительность устройства Q. Полученный алгоритм и программа расчета могут применяться для разработки системы управления забойным электропарогенератором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция государственного управления рациональным использованием запасов нефти / ОАО «ВНИИнефть». М., 2005.

2. Мелкие и трудноосваиваемые месторождения нефти Северо-Запада России / В.Н.Макаревич, О.М.Прищепа, Б.И.Давыденко и др. // НефтьГазПромышленность. 2006. № 4 (24).

3. Пат. 2208145 РФ, Устройство для тепловой обработки призабойной зоны скважины / В.С.Литвиненко, Б.Б.Кудряшов, Г.Н.Соловьев, Э.А.Загривный. Опубл.10.07.03. Бюл. № 15.

4. Пат. 2266401 РФ. Способ тепловой обработки призабойной зоны скважины / Э.А.Загривный, С.Н.Батаев. Опубл.20.10.05. Бюл. № 35.

5. Перспективы использования забойных электротермических комплексов для повышения нефтеотдачи пластов с тяжелой высоковязкой нефтью. /Э.А.Загривный, А.Е.Козярук, В.И.Маларев, Е.Е.Мельникова // Электротехника. 2010. № 1.

REFERENCES

1. Conception of state management in rational oil resources using / OAO «VNIINEFT». Moscow, 2005.

2. *Macarevich V.N., Prischepa O.M., Davidenko B.I.* etc. Small and hardextracted oil fields of North-West Russia // OilGasIndustry. 2006. N 4 (24).

3. Patent 2208145 RF. Device for thermal treatment in bottomhole zone / V.S.Litvinenko, B.B.Cudryashov, G.N.Soloviev, E.A.Zagrivniy. Publ.10.07.03. N 15.

4. Patent 2266401 RF. Heat processing techniques for bottom hole zone / E.A.Zagrivniy, S.N.Bataev. Publ.20.10.05. N 35.

5. *Zagrivniy E.A., Kozyaruk A.E., Malarev V.I., Melnikovs E.E.* Perspective of using the electrothermal complexes for encreasing high oil viscosity extraction // Electrotechnic. 2010. N 1.