

И.Ф.ДОМНИН, д.т.н., директор, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков;

М.М. РЕЗИНКИНА, д.т.н., гл.н.с., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков;

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Виконано постановку завдання чисельного розрахунку електротеплових процесів щодо вибору оптимальних режимів електромагнітного впливу на нафтопродукти.

A task of numerical calculation of electrical heating processes has been proposed for choice of optimum regimes of electromagnetic influence upon petroleum products.

Введение. Согласно [1], важной задачей является устранение парафиновых и других углеводородных отложений, которые при определенных условиях закупоривают нефтяные и газовые скважины или трубопроводы в процессе их эксплуатации. В настоящее время существует ряд методов предотвращения образования таких пробок, а также их устранения. Однако данные методы, как правило, дорогостоящие, к тому же часть из них связана с использованием весьма токсичных химических веществ. Использование мощного микроволнового излучения для разрушения таких пробок, а также снижения вязкости нефтепродуктов является перспективным для решения данной проблемы.

Как отмечается в [2], нетрадиционные технологии переработки нефтяных остатков, к которым относится использование СВЧ - облучения, еще не доведены до промышленной апробации. Целью работы является постановка задачи расчета электротепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов для выбора оптимальных режимов обработки.

Применение высокочастотного электромагнитного излучения для воздействия на нефтепродукты. Диэлектрическая проницаемость материалов с потерями – это комплексная величина [3]:

$$\dot{\epsilon}_a = \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'') = \epsilon_0 \dot{\epsilon},$$

где $\dot{\epsilon}_a$ - комплексная диэлектрическая проницаемость; $\dot{\epsilon}$ - относительная комплексная диэлектрическая проницаемость; ϵ' - относительная диэлектрическая проницаемость; ϵ'' - коэффициент, характеризующий потери; $\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11}$ Ф/м.

Потери в диэлектриках обычно оцениваются с помощью тангенса угла диэлектрических потерь, который определяется следующим образом [4]:

$$\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'.$$

Такие потери обуславливаются как перемещением носителей заряда, так и трением, возникающим при переориентации диполей [4]. Для диэлектриков с потерями Δ - глубина проникновения электромагнитного поля (ЭМП) определяется как расстояние, на котором плотность мощности уменьшается в e раз по сравнению со значением на поверхности. Согласно [5], при малой величине $\text{tg}\delta$ глубина проникновения может быть записана в виде:

$$\Delta = c \cdot \sqrt{\varepsilon''} / (2\pi \cdot f \cdot \varepsilon''),$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

В [6] отмечается перспективность применения высокочастотного электромагнитного излучения для расплавления асфальтово-парафиновых отложений и уменьшения вязкости нефти. Для того чтобы выбрать оптимальные режимы электромагнитного воздействия на нефтепродукты, целесообразным представляется использование математического моделирования происходящих электротепловых процессов. При этом необходимо учесть нелинейную зависимость проводимости нефтепродуктов от температуры их нагрева. Так, в [7] указывается, что электропроводность нефти превышает электропроводность диэлектриков на $4 \div 7$ порядков и составляет при комнатных температурах от $\sim 10^{-9} \div 10^{-8}$ См/м для легких нефтей до $\sim 10^{-7} \div 10^{-6}$ См/м для тяжелых карбоновых. Причем нагрев нефти приводит к экспоненциальному росту ее электропроводности [7]. Таким образом, для решения данной задачи требуется использование численных методов расчета.

Постановка задачи математического моделирования процесса микроволнового нагрева применительно к обработке нефти и нефтепродуктов. Сформулируем задачу расчета электромагнитного поля

через модифицированный векторный магнитный потенциал \vec{A} [8,9]. Такой подход обеспечивает существенное уменьшение числа решаемых уравнений. Учитывая, что рассматривается случай воздействия микроволнового ЭМП, воспользуемся символическим методом. При этом векторы, характеризующие распределение ЭМП, будем записывать в виде комплексных амплитуд. Выразим напряженность электрического поля \vec{E} и индукцию магнитного поля \vec{B} через \vec{A} :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} ; \tag{1}$$

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} , \tag{2}$$

где $j = \sqrt{-1}$; ω - круговая частота.

Для решения задачи расчета электромагнитного поля может быть использован численный метод конечного интегрирования (см. например [10,11]). Данный метод предполагает наложение на рассматриваемую область

расчетной сетки и интегрирование уравнений Максвелла по граням образовавшихся ячеек. Такой подход позволяет получить решаемые уравнения, используя закон сохранения тока. В результате не требуется дополнительно вводить условия на границах раздела сред, поскольку они учитываются автоматически [12]. Данный метод позволяет также учесть при расчете распределения электромагнитного поля нелинейность электрических параметров сред [13].

Для нахождения распределения напряженностей ЭМП, разобьем рассматриваемую область на элементарные ячейки. В пределах каждой из ячеек электрические параметры среды полагаются одинаковыми. Решаемое уравнение получим путем интегрирования I уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E} + j\omega \vec{D}, \quad (3)$$

где \vec{H} - напряженность магнитного поля; \vec{D} - индукция электрического поля; γ - удельная электропроводность

по сечениям, перпендикулярным координатным осям. Учитывая, что резервуары для хранения нефтепродуктов, нефтепроводы, а также скважины для их добычи могут быть представлены в виде цилиндров, используем для описания электротепловых процессов осесимметричную цилиндрическую систему координат, в которой переменные зависят от r и z . При этом будем полагать, что напряженность электрического поля источника электромагнитного излучения в плоскости $z=0$ имеет только нормальную компоненту. Тогда, при представлении нефтепровода или скважины в виде цилиндрического волновода, заполненного диэлектрической средой с потерями, отличными от нуля будут только E_z и E_r [6].

Уравнение для \dot{A}_z - z -ой компоненты вектора \vec{A} получим в результате интегрирования (3) по сечению S_z ($Z=\text{const}$) и использования теоремы Стокса:

$$\oint_{l_z} \vec{H} d\vec{l} = \int_{S_z} \gamma \dot{E}_n ds + j\omega \int_{S_z} \dot{D}_n ds, \quad (4)$$

где l_z - контур, охватывающий площадку S_z ; \dot{E}_n, \dot{D}_n - проекции векторов \vec{E}, \vec{D} на нормаль к плоскости S_z .

Выразив \vec{H} и \vec{E} через \vec{A} (см. (1), (2)) окончательно получим:

$$\frac{1}{\mu_0} \oint_{l_z} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} d\vec{l} = -j\omega \int_{S_z} \gamma \dot{A}_z ds + \omega^2 \varepsilon_0 \int_{S_z} \dot{\varepsilon} \dot{A}_z ds, \quad (5)$$

где μ - относительная магнитная проницаемость; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Запишем уравнение вида (6) для r -й компоненты вектора \vec{A} , проинтегрировав (4) по площадке S_r :

$$\frac{1}{\mu_0} \oint_{l_r} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} d\vec{l} = -j\omega \int_{S_r} \gamma \dot{A}_r ds + \omega^2 \varepsilon_0 \int_{S_r} \dot{\varepsilon} \cdot \dot{A}_r ds. \quad (6)$$

Граничные условия будут зависеть от вида решаемой задачи.

Система решаемых уравнений может быть получена в результате записи выражений вида (5), (6) в разностном виде для каждого узла расчетной сетки.

Температура диэлектрика при воздействии микроволнового излучения изменяется во времени гораздо медленнее, чем векторы напряженности ЭМП. Поэтому будем решать задачу расчета ЭМП на тех временных шагах расчета тепловых процессов, на которых электрические параметры сред, зависящие от температуры, будут претерпевать изменения.

Для нахождения распределения температуры нагрева по сечению цилиндрического резервуара с нефтепродуктами, подвергающимися воздействию высокочастотного электромагнитного излучения, запишем двумерное уравнение теплопроводности [6]:

$$\rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + Q(r, z, t), \quad (7)$$

где T – температура; ρ , c_T , λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность соответственно; $Q(r, z, t)$ – плотность мощности объемного тепловыделения.

В [6] отмечается, что плотность и теплопроводность нефти обычно полагают не зависящими от температуры, теплоемкость же представляют в виде функции, имеющей δ -особенность при температуре фазового перехода T_S :

$$c_T = c_0 + L \cdot \delta(T - T_S), \quad (8)$$

где L – скрытая теплота фазового перехода; δ – дельта-функция.

Плотность мощности объемного тепловыделения в плоскости падения электромагнитной волны $z=0$ может быть записана в виде [14]:

$$Q(r, 0, t) = \frac{\omega}{2} |\vec{E}|^2 \varepsilon_0 \varepsilon'' ,$$

где ε'' мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости.

В [6] уравнение (7) дополнено граничными условиями: конвективного теплообмена по закону Ньютона в плоскости падения электромагнитной волны $z=0$:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \kappa [T(r, 0, t) - T_0], \quad (9)$$

где T_0 – температура окружающей среды; κ – коэффициент теплообмена и отсутствия теплообмена на удаленном торце цилиндрического резервуара $z=H$:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0. \quad (10)$$

На боковой поверхности цилиндра $r=R$ граничное условие можно записать с помощью закона конвективного теплообмена с учетом тепловыделения на поверхности металлической трубы-волновода [6]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \kappa \cdot [T(R, z, t) - T_0] - q(z, t),$$

где $\kappa = Nu \cdot \lambda / R$ - коэффициент теплообмена с внешней средой; Nu - число Нуссельта; q - поверхностная плотность мощности тепловыделения.

Электрофизические параметры нефти (литературные данные). При математическом моделировании рассматриваемых электротепловых процессов, необходимо задать электрофизические параметры нефтепродуктов. Для этого могут быть использованы литературные данные. Согласно [6], константы, входящие в (7) - (10), для высокопарафинистой нефти имеют следующие значения: $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$, $c_0 = 3 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, $T_S = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $L = 300 \text{ кДж/кг}$, $\lambda = 0.125 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $\varepsilon'_0 \approx 2.3$, $\text{tg}\delta = \varepsilon''_0 / \varepsilon'_0 \approx 1.2 \cdot 10^{-2}$, $\kappa_1 = 0.2 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, $\kappa = 1.613 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, $Nu = 1$.

В [15] приводятся зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры при микроволновом нагреве и дегазации нефти (см. рис. 1). В [15] отмечается, что величина относительной диэлектрической проницаемости ε' при этом практически не меняется. По мнению авторов данной работы, снижение $\text{tg}\delta$ при повышении температуры обусловлено уменьшением времени релаксации, а значит возможностью более полного развития процессов поляризации. Повышение $\text{tg}\delta$ при дегазации объясняется в [15] тем, что дегазированная нефть плотнее и обладает большей вязкостью, что затрудняет поляризационные процессы.

В [16,17] приведены зависимости диэлектрической проницаемости ε' от температуры, измеренной на частотах 500, 1000 и 4300 Гц (рис. 2) для Мангышлакской нефти.

Такие зависимости ε' в [17] объясняют тем, что при низкой температуре ориентация диполей в большинстве случаев невозможна, так почти все составные части нефти образуют кристаллическую решетку. При повышении температуры появляется возможность ориентации диполей в направлении электрического поля, что приводит к возрастанию диэлектрической проницаемости. Однако при дальнейшем повышении температуры тепловые колебания молекул усиливаются, в результате чего, начиная с некоторой температуры, диэлектрическая проницаемость уменьшается.

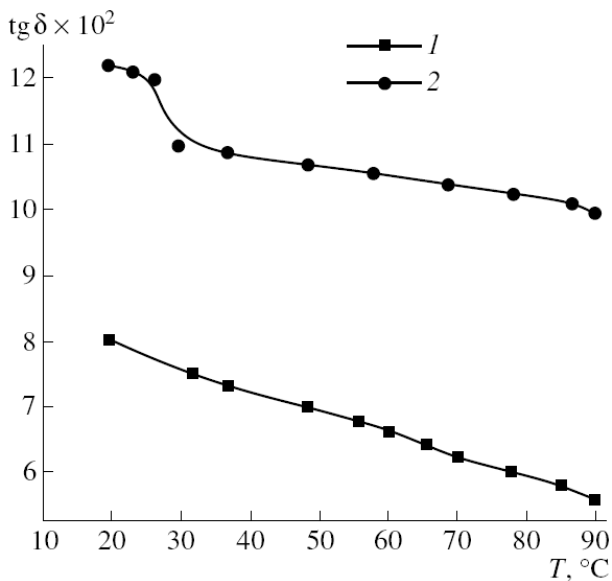


Рис. 1. Экспериментально полученные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь Кушкульской нефти (Россия) при высокочастотном воздействии (частота 81 МГц, мощность 14 Вт) и сопутствующей ему дегазации от температуры (1 – до ВЧ воздействия; 2 – после) [15].

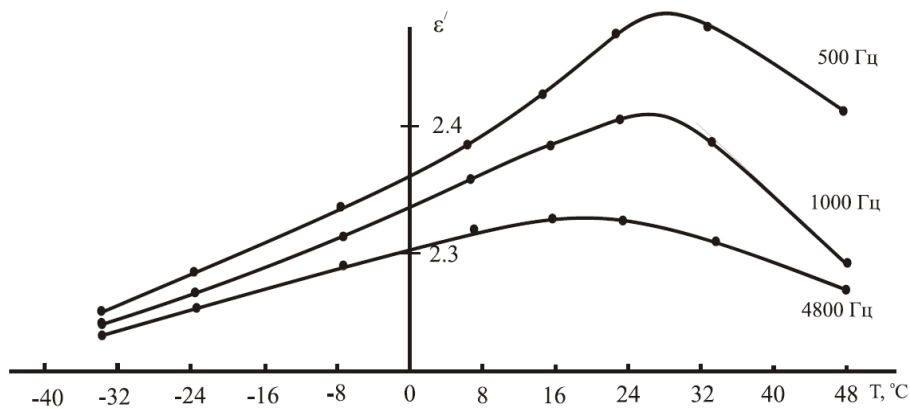


Рис. 2. Экспериментально полученные зависимости ϵ' Мангышлакской нефти (Россия) от температуры [16].

Закключение. Для выбора оптимальных режимов электромагнитного воздействия на нефтепродукты может быть использовано математическое моделирование происходящих электротепловых процессов. Авторами выполнена постановка задачи расчета происходящих при этом электротепловых процессов. Задача расчета электромагнитного поля сформулирована в терминах модифицированного векторного потенциала. Уравнение теплопроводности записано с учетом фазового перехода нефтепродуктов. При формулировке задачи использована цилиндрическая система координат в приближении осесимметричности рассматриваемых систем. Имеющиеся литературные данные по электрофизическим параметрам нефти позволяют использовать численное моделирование для выбора режимов высокочастотного нагрева.

Список литературы: 1. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Устранение парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтяных трубопроводах высокочастотным электромагнитным излучением // Электромагнитные явления. – 2001. – Т. 2, № 3(7). – С. 380-401. 2. Капустин В.М., Чернышева Е.А. Современное состояние и перспективы развития процессов переработки тяжелых нефтяных фракций и остатков // Мир Нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2009. – № 9-10. – С. 20-24. 3. Морозов О., Каргин А., Савенко Г., Требух В., Воробьев И. Промышленное применение СВЧ – нагрева // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 3. – С. 2-6. 4. Хиттель А.Р. Диэлектрики и волны. - М.: Иностранная литература, 1960, 438 с. 5. Mehdizadeh M. Microwave/RF applicators and probes for material heating, sensing and plasma generation. A design guide. - San Diego (CA), USA: Elsevier, 2010, 389 p. 6. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Разрушение асфальто-парафиновых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, вып. 9. – С. 1-8. 7. Промысловая подготовка нефти с использованием электрических полей — оптимизация выбора параметров источников питания. Часть 2 // Нефтех. – 2008 (http://www.keyboardjazz.com/modules_name_AvantGo_op_ReadStory_sid_36.html). 8. Biro O., Preis K. // IEEE Trans. on Magnetics. - 1989. - Vol. 25, No. 4. - P. 3145-3159. 9. Clemens M., Weiland T. // IEEE Trans. on Magnetics. - 2003. - Vol. 39, № 3. - P. 1175-1178. 10. Clemens M., Weiland T. // IEEE Trans. on Magnetics. - 2002. -V.38., № 2. - P. 569-572. 11. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984, 150 с. 12. Резинкина М.М., Резинкин О.Л., Лисачук Г.В. Расчет электромагнитного поля в терминах модифицированного векторного магнитного потенциала с помощью метода конечного интегрирования // Темат. вып. “Силовая электроэнергетика та энергоэффективність”, ч. 2. - 2011. – С. 219 - 224. 13. Резинкина М.М., Резинкин О.Л. Моделирование процессов обострения фронта электромагнитной волны в нелинейном диэлектрике // Журнал технической физики. – 2011. - Т. 81, № 3. - С. 91-97. 14. Alpert Y., Jerby E. Coupled thermal-electromagnetic model for microwave heating of temperature-dependent dielectric media // IEEE Transactions on Plasma Science. - 1999 - Vol. 27, No. 2. - P. 555-562. 15. Фатыхов М.А., Иорисов Р.И. Экспериментальные исследования влияния дегазации на диэлектрические свойства жидкостей в высокочастотном электромагнитном поле // Теплофизика высоких температур. – 2008. - Т. 46, № 4. – С. 639-640. 16. Фатыхо М.А., Багаутдинов Н.Я. Воздействие электромагнитного поля на процесс кристаллизации парафина // Нефтегазовое дело. - № 1. - С. 1-10. 17. Губин В.Б., Бондаренко П.М. Некоторые электрофизические свойства Мангышлакской нефти // РНТС: Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. - 1967. - №8. – С. 10-13.

Поступила в редколлегию 28.05.2012