

УДК 62-225; 553.9.082.74

Микроволновый разогрев нефтепродуктов в трубопроводах

Н.Н. Морозов¹, Г.В. Кашкатенко²

¹ *Политехнический факультет МГТУ, кафедра физики*

² *Естественно-технический факультет МГТУ, кафедра механики сплошных сред и морского нефтегазового дела*

Аннотация. Нагрев нефтепродуктов высокочастотными электромагнитными волнами является эффективным методом объемного разогрева. Современные исследования показали его эффективность в различных условиях применения. Однако эти публикации носят в большинстве случаев теоретический характер, рассматривая трубопровод как волновод для электромагнитных полей. Такой подход не эффективен, прежде всего, из-за значительных затуханий волн в среде, приводящих к уменьшению скорости прогрева асфальто-парафиновых пробок из-за неравномерного распределения энергии вдоль трубопровода. Введением несимметричной полосковой линии внутрь трубопровода проблема равномерного прогрева может быть в значительной мере решена.

Abstract. Oil product's high-frequency electromagnetic heating is an effective tool of volume heating. Present-day researches demonstrate the efficiency of this heating method. But most researches represent pipelines as a certain feeder ducting electromagnetic energy. From our point of view such approach is not effective due to great attenuation of electromagnetic waves giving it a considerable loss of time in elimination of asphalt-paraffin plugs. The asymmetrical strip line enclosed into the pipe can be used for solution to the problem of uniform heating.

Ключевые слова: СВЧ излучение, трубопровод, объемный разогрев, несимметричная полосковая линия
Key words: microwave radiation, pipeline, volumetric heating, asymmetric strip line

1. Введение

В печати стали появляться проекты (Фатыхов, 2002; Фатыхов, Багаутдинов, 2007) применения ВЧ и СВЧ излучения для прогрева нефтепродуктов и газогидрата в скважинах и участках нефтепроводов, простаивающих из-за образования газогидратных и парафиновых пробок. Применение этих методов обусловлено рядом преимуществ их по сравнению с градиентными методами переноса тепла. При распространении электромагнитных волн в диэлектрической среде, ограниченной проводящими стенками, возникает направленный поток энергии, который частично диссипируется средой за счет диэлектрических потерь. В результате в среде появляются объемные тепловые источники, позволяющие решить задачу восстановления трубопроводов.

2. СВЧ разогрев нефтепродуктов при их транспортировке трубопроводами

В вышеуказанных проектах электромагнитная энергия поступает с торца трубы и канализируется по трубе, которая играет одновременно роль волновода. Такой подход обладает рядом недостатков. Волновод является диспергирующим устройством, то есть в нем наблюдается частотная дисперсия, которая может приводить к отсечке канализации энергии в зависимости от частоты электромагнитных колебаний и геометрии волновода. При резких границах раздела сред, а также при значительных затуханиях волн возникают отражения, которые пагубно влияют на источник излучения. Мощные источники СВЧ излучения не могут работать при коэффициентах стоячей волны более трех. К недостаткам такого метода подвода энергии можно отнести также и большое время восстановления трубопроводов, которое даже при значительных энергиях излучения исчисляется сутками (Фатыхов, 2002).

Для решения задачи восстановления трубопроводов в критических точках (выход трубопровода на поверхность земли или в местах глубокого промерзания) предлагается использовать введенную в трубопровод при его монтаже систему взаимодействия волн СВЧ диапазона с нефтепродуктами, связанную электрически с источником СВЧ энергии. Система взаимодействия представляет собой тефлоновую вставку, покрывающую внутреннюю поверхность трубопровода, фольгированную медной полосой в виде спирали, которая играет роль полосковой линии передач, с распределенными вдоль нее щелевыми излучателями (рис. 1; рис. 2).

Несимметричная полосковая линия передач (НПЛ) – двухпроводная полосковая линия с поперечным сечением в виде параллельных прямых, имеющая одну плоскость симметрии, параллельную направлению распространения энергии.

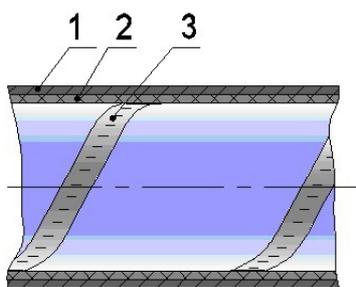


Рис. 1. Система взаимодействия СВЧ-энергии с нефтепродуктами в трубопроводе

- 1 – труба
- 2 – тефлоновая вставка
- 3 – спиральный электрод полосковой линии передач с щелевыми излучателями

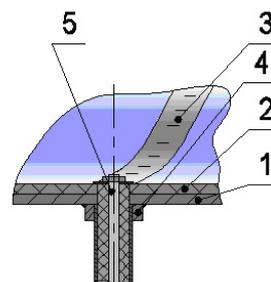


Рис. 2. Узел ввода СВЧ-энергии

- 1 – труба
- 2 – тефлоновая вставка
- 3 – электрод полосковой линии
- 4 – фланец
- 5 – коаксиальный фидер

Стандартные СВЧ тракты коаксиального типа имеют волновое сопротивление $Z=50$ Ом. Для согласования полосковой линии с трактом её волновое сопротивление должно быть таким же. Относительная диэлектрическая проницаемость подложки ϵ (тефлона) отличается от относительной диэлектрической проницаемости окружающего пространства (нефть или газ). Рассчитаем ширину полоски W и высоту подложки диэлектрика h (Бахарев и др., 1982):

$$d = (Z / 60) \cdot [(\epsilon + 1)/2]^{0.5} + [(\epsilon - 1)/(\epsilon + 1)] \cdot (0.226 + 0.12/\epsilon),$$

$$d_1 = 60 \cdot \pi^2 / Z \cdot \epsilon^{0.5},$$

$$W / h = (2 / \pi) \cdot (d_1 - 1) - (2 / \pi) \cdot \log(2d_1 - 1) + [(\epsilon - 1) / \pi \cdot \epsilon] \cdot [0.293 - (0.517/\epsilon) + \log(d_1 - 1)],$$

$$W / h = 3.26.$$

Такой подход позволяет вводить энергию равномерно в весь объем трубопровода и решает проблему согласования нагруженного фидера с источником излучения, а также использовать сравнительно маломощные (до 25 кВт) источники излучения, тем самым решить проблему СВЧ пробоев.

Полосковая линия, как и коаксиальный кабель, является широкополосным фидером. Это позволяет использовать энергию как СВЧ, так и ВЧ диапазонов, что делает эффективным электромагнитный нагрев для разных углеводородных систем.

Наиболее остро проблема прогрева трубопровода встает при образовании газогидратов в процессе транспортировки газа газопроводами. Это связано с конденсированными образованиями в трубе при достижении критических температур, когда газогидрат образует нарост на внутренней поверхности трубы, закупоривающий трубопровод (Дектярев, Бухгалтер, 1976).

В предположении, что тепловые источники распределены равномерно в объеме трубы, и пренебрегая градиентными потерями тепла, время прогрева до разложения газогидрата можно оценить, используя уравнение теплового баланса

$$c\rho(T - T_0) + L\rho = Wt/V,$$

где c и ρ – теплоемкость и плотность газогидрата; T и T_0 – температуры разложения газогидрата и начальная температура соответственно; W – мощность источника СВЧ излучения; V – прогреваемый объем и время нагрева до разложения газогидрата; L – удельная теплота фазового перехода.

Используя теплофизические параметры газогидрата, приведенные в книге (Гройсман, 1985), и температуру фазового перехода при определенном давлении в трубопроводе и уравнение параметров гидратообразования (Дектярев, Бухгалтер, 1976) можем получить соотношение между температурой T в градусах Цельсия и давлением P в атмосферах:

$$T = T_h \cdot \lg P - 0.7, \tag{1}$$

где T_h – эмпирический параметр, имеющий размерность температуры и зависящий от состава природного газа.

Этот подход может быть также применен к подводным магистральным трубопроводам. Рассмотрим проектные решения для подводного газопровода со Штокмановского газоконденсатного месторождения (Пануша, 2002). Для магистрального трубопровода с наружным диаметром 1020 мм

производительностью примерно 90.5 млн. м³/сутки по методике норм ОНТП 51-1-85 с учетом эффекта Джоуля-Томпсона необходимо решить следующую систему термобарических уравнений течения газа:

$$\begin{aligned} dP/dx &= \{(g/R_a)P[\Delta/z(P,T) \cdot T] \cdot (dH/dx)\} - (8\rho_a^2 \cdot R_a/\pi^2) \cdot [10^{-12} \cdot \lambda \cdot \Delta \cdot z(P,T) \cdot T/P \cdot D_0^5] \cdot q \cdot \text{Abs}[q]; \\ (dT/dx) - D_i(P,T) \cdot (dP/dx) &= -[g/10^3 \cdot c_g(P,T)] \cdot (dH/dx) - (\pi/\rho_a) \cdot [\pi \cdot K_c \cdot D_n/10^3 \cdot c_g(P,T) \cdot q \cdot \Delta] \cdot (T - t_b), \end{aligned}$$

где $P(x)$ – давление флюида в трубе; x – координата по длине трубопровода; g – ускорение свободного падения; R_a – газовая постоянная; Δ – относительная плотность многокомпонентного газа по воздуху; $z(P,T)$ – коэффициент сжимаемости газа; $T(x)$ – температура флюида в трубе; $H(x)$ – ордината оси трубы в вертикальной плоскости, определяемая по геодезическим высотам; ρ_a – плотность воздуха; λ – коэффициент гидравлических сопротивлений; q – удельный (на единицу площади) поток тепла через стенку трубы; $D_i(P,T)$ – коэффициент Джоуля-Томпсона; $c_g(P,T)$ – теплоемкость газа; K_c – коэффициент теплопередачи от флюида в окружающую среду; D_0 и D_n – внутренний и наружный диаметры трубопровода; t_b – температура среды, окружающей трубопровод.

В результате получаем следующие распределения температуры и давления транспортируемого продукта по длине трубопровода (рис. 3):

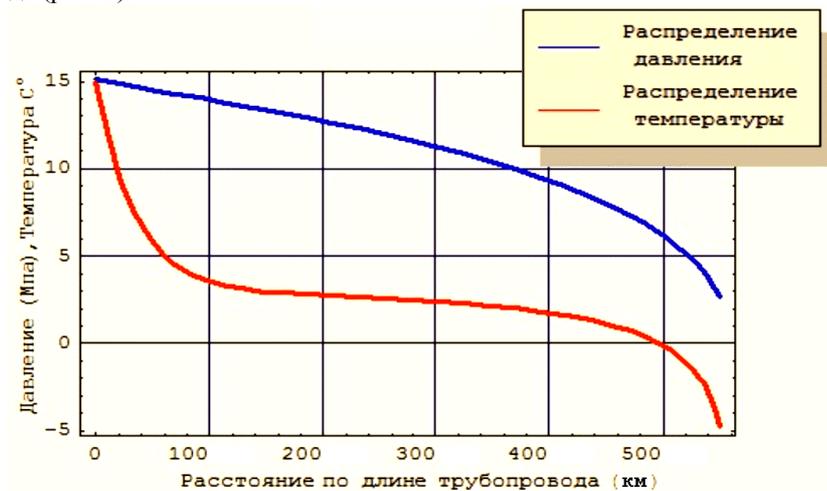


Рис. 3. Распределение температуры и давления по длине газопровода

Для этого месторождения коэффициент T_h в формуле (1) примем равным 0.39° С. Образование газогидратных отложений можно ожидать на расстояниях порядка 500 км. На этой отметке целесообразно расположить секцию для СВЧ подогрева газового потока.

3. Заключение

Рассмотрена возможность применения микроволнового метода нагрева с использованием системы взаимодействия, состоящей из узла ввода и компактного микрополоскового волновода, расположенного на внутренней части диэлектрического покрытия металлического трубопровода.

Данная методика может быть применена как для магистральных, так и для технологических трубопроводов и является весьма эффективной в условиях Крайнего Севера.

Литература

- Бахарев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. М., Радио и связь, 328 с., 1982.
- Гройсман А.Г. Теплофизические свойства газовых гидратов. Новосибирск, Наука, 94 с., 1985.
- Дектярев Б.В., Бухгалтер Э.Б. Борьба с гидратами при эксплуатации газовых скважин в северных районах. М., Недра, 200 с., 1976.
- Папуша А.Н. Проектные расчеты магистральных наземных и подводных газопроводов: Применение компьютерной среды Mathematica. Электронные лекции и практические занятия по дисциплине "Транспорт и хранение нефти и газа", Мурманск, МГТУ, 208 с., 2002.
- Фатыхов М.А. Тепломассоперенос в многофазных средах под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения. Химия и компьютерное моделирование. Приложение к спецвыпуску, № 10, 243 с., 2002.
- Фатыхов М.А., Багаутдинов Н.Я. Расчетные исследования разложения газогидрата в скважине при воздействии высокочастотной электромагнитной волны. М., Нефтяное дело, 186 с., 2007.