

Оптимизация выбора параметров зондирующих СВЧ сигналов, распространяющихся в длинномерных волноводах, заполненных жидкими веществами и примесями

А.Б. Горощеня, В.А. Майстренко, А.И. Елецкий

Омский государственный технический университет 644050
Омск-50, пр. Мира, 11 E-mail: mva@omgtu.ru

В докладе приведены результаты исследования распространения СВЧ сигналов в волноводах большой длины, заполняемых водой, чистой нефтью и нефтью с примесями: аналитические зависимости, таблицы и графики расчётных значений оптимальных диапазонов частот для наиболее часто используемых в скважинах диаметров насосно-компрессорных труб, зависимости затухания волны H_{01} и H_{11} от частоты для различных внутренних диаметров и материала круглого волновода. Приведены результаты экспериментальных исследований значений дополнительного затухания ЭМВ в нефти и её отложениях в диапазоне частот 2-18 ГГц, подтверждающие теоретические выводы. Предлагается в основу СВЧ нагрева нефти положить нагрев за счет потерь СВЧ энергии в стенках волновода и в очагах нефтяных отложений и использование для СВЧ нагрева частот, максимально близких к критическим, для типов волн круглого волновода H_{01} и H_{11} .

The report presents the results of studying the emitting of microwave signals in long length waveguides filled with water, clean oil and oil with contaminants: analytical dependences, tables and graphs of calculated values for optimal frequency bands commonly used in wells diameter tubing, depending on the wave damping H_{01} and H_{11} of the frequency for different internal diameters and circular waveguide material. There are experimental results of the additional damping values of EM waves in oil and its sediments in the frequency range 2-18 GHz confirming the theoretical conclusions. It is proposed to consider the heating by microwave energy losses in the waveguide walls and in oil bed sources as the basis of microwave heating of oil and to use microwave heating frequencies as close to critical for types of waves in circular waveguide H_{01} and H_{11} .

Идеи об использовании мощных потоков электромагнитной энергии СВЧ диапазона для добычи полезных ископаемых были высказаны еще в 50-х годах XX века [1]. В настоящее время успехи СВЧ энергетики привели к широкому применению СВЧ нагрева в промышленности и в бытовой технике. Однако установки, необходимые для расплавления парафино-гидратных пробок нефтяных скважин, имеют существенное отличие от СВЧ печей как бытового, так и промышленного применения. Конструкция обычной СВЧ печи такова, что энергия электромагнитного поля в основном локализована в объеме нагревательной камеры, а потери в стенках камеры не существенны для работы печи. Установка для нагрева нефтяных пробок в насосно-компрессорных трубах (НКТ) нефтяных скважин – открытая система. Потери энергии через стенки НКТ являются неизбежными и могут быть значительными. В результате возможна ситуация, когда устранить пробку в НКТ невозможно. Другая, не очевидная ситуация, обнаруженная автором работы [2], заключается в том, что при технически достижимом и экономически оправданном уровне мощности, система асимптотически приближается к тепловому равновесию, температура которого ниже температуры плавления пробки. В этом случае пробка также остается неустранимой. В соответствии с выводами статьи [2], результативный нагрев возможен лишь при оптимальном сочетании значения затухания на единицу длины пробки $\acute{\alpha}$ и длины пробки L :

$$\acute{\alpha} = 1/L .$$

Постоянная « α » зависит от частоты электромагнитной волны и состава материала пробки.

Исследование этой зависимости, а также других электромагнитных и тепловых параметров нефти и ее составляющих выполнены в Тюменском государственном университете. Из данных, приведенных в [2], следует, что *оптимальная частота для прогрева пробки достаточно большой длины (порядка 100м) соответствует диапазону частот 10 ... 20 МГц*. Отмечено, также, что указанные частоты на порядок ниже *частоты оптимального прогрева пласта (порядка 300 МГц)*. Этот факт можно рассматривать как следствие анизотропного характера материала пробки и разной частотной зависимости его пространственных свойств. В соответствии с этим, возможна зависимость затухания в пробке от пространственной структуры нагревающей электромагнитной волны. Однако указанный частотный диапазон не возможно использовать для устранения пробки в полый НКТ, т.к. в этом случае частота распространяющейся электромагнитной волны определяется внутренним диаметром НКТ и для обычно используемых диаметров НКТ определяется из соотношения:

$$f > 10/D \text{ (ГГц)},$$

где D - внутренний диаметр трубы в мм.

Следует заметить, что выбор электромагнитной модели НКТ в виде полого металлического волновода или коаксиальной линии передачи, рассматриваемой в [2], зависит от способа прокачивания нефти при образовании пробки. Полый волновод соответствует использованию центробежного насоса, коаксиальная линия – штангового насоса. Последний обычно используется при добыче тяжелой нефти. Из работ [2-3] следует, что в соответствующих условиях устранение пробки СВЧ нагревом вполне возможно. Для нефтяных пластов СВЧ нагрев был успешно осуществлен и признан экономически выгодным [3]. Возможность устранения пробок СВЧ нагревом в полый НКТ потребовал дополнительных исследований. Прежде всего была проведена оценка потери электромагнитной энергии в стенках НКТ.

Величина потерь в линии передачи (ЛП) между источником энергии и нагревательной камерой – один из важнейших факторов, определяющих возможность дистанционного СВЧ нагрева. Ниже приводятся результаты расчетов потерь для круглого волновода с волнами H_{11} и H_{01} , взятые из статьи авторов [4] и дополненные расчетами потерь для электрической модели НКТ в виде коаксиальной линии.

Изучение ЛП в виде круглого полого волновода представляет интерес также для транспортировки нефти по нефтепроводам. В данном случае линией передачи энергии будет сама нефтяная труба. В реальных условиях ось трубы искривлена, граница внутреннего сечения не идеальная окружность и меняется вдоль трубы, стенка трубы не представляет регулярной поверхности и покрыта нефтяной пленкой переменной толщины, труба может быть заполнена жидкостью, нефтью с водой. Однако, прежде чем учитывать все эти факторы, нужно оценить потери для «идеального случая»: полого круглого прямолинейного волновода, изготовленного из соответствующего материала. Это позволит дать ответ на вопрос: возможно ли с помощью существующих СВЧ генераторов получить необходимый уровень мощности на выходе прямой стальной трубы соответствующего диаметра и длины в нужном диапазоне частот. Влияние остальных факторов проще и надежнее оценить экспериментально. Были проведены расчёты, позволившие оптимизировать выбор типа волны и рабочих частот и оценить затухание ЭМВ в круглом волноводе и коаксиальной линии. Первоначально предполагалось, что для передачи энергии в круглом волноводе будет возбуждена слабо затухающая волна H_{01} . Однако из работ по дальней передаче электроэнергии следует, что волна H_{01} очень чувствительна к геометрическим характеристикам линии

передачи (отклонение оси трубы от прямолинейности т.п.) и на каждой неоднородности порождает волноводные волны других типов с большим затуханием. Поэтому ниже представлены расчеты потерь как для волны H_{01} , так и для волны H_{11} – волны основного типа для круглого волновода. Преимущество этой волны заключается в том, что она является единственно распространяющейся при определенном соотношении частоты и внутреннего диаметра трубы. Дополнительные потери энергии в стенках волновода, связанные с волной H_{11} по сравнению с H_{01} , придется компенсировать увеличением мощности СВЧ генератора.

В реальном круглом волноводе малое относительно волн других типов затухание волны H_{01} имеет место при выполнении следующих условий [5]:

$$\lambda \leq (1/6 \div 1/4) \lambda_{кр.H_{01}}, \quad \lambda_{кр.H_{01}} = 1,64a \quad ,$$

где λ - длина волны в воздухе,

$\lambda_{кр.H_{01}}$ - критическая длина волны для волны типа H_{01} ,

a - внутренний радиус трубы.

Вычисленные в соответствии с этими условиями оптимальные диапазоны частот и длин волн для наиболее часто используемых в скважинах диаметров насосно-компрессорных труб (НКТ) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Диапазоны частот и длин волн оптимального распространения волны H_{01} в зависимости от внутреннего диаметра трубы

Внутренний диаметр НКТ (мм.)	Оптимальный диапазон	
	Частоты (ГГц.)	Длины волны (мм.)
49	29,9÷44,8	10÷6,7
55,5	26,4÷39,5	11,4÷7,6
78	18,7÷28,1	16÷10,7

Для сравнения в таблице 2. для тех же труб указаны обычно используемые диапазоны одномодового режима для волны H_{11} ($\lambda_{кр.H_{11}} = 3,41a$).

Таблица 2. Диапазоны частот и длин волн одномодового распространения H_{11} в зависимости от диаметра НКТ

Внутренний диаметр НКТ (мм.)	Частоты (ГГц.)	Длины волн (мм.)
49	4,69÷3,59	69,3÷83,5
55,5	4,14÷3,17	72,4÷94,6
78	2,95÷2,26	101,8÷133

С учётом затухания в среде, заполняющей волновод (водяные пары), к частотам таблицы 1. ближе всего "окно радиопрозрачности" со средней длиной волны 8,65 мм. Ему соответствует затухание 0,07 дБ. /км. [6], которое имеет место при температуре 15⁰С и средней влажностью 60%. При увеличении влажности потери растут. Для волны H_{11} затуханием в водяных парах в соответствующих диапазонах можно пренебречь [6].

Рабочую частоту для волны H_{01} придется выбирать между левыми границами частот в таблице 1. и средней частотой окна прозрачности из условия: минимум затухания – максимума нагрева.

Расчёт затуханий ЭМВ проводился по полученной авторами расчетной формуле для α_{np} (дБ/км), удобной для работы в Mathcad:

$$\alpha_{np}(f, a, \sigma) = \frac{4.343 * 10^5}{a_{[мм]}} \sqrt{\frac{f_{[ГГц]}}{\sigma_{[См/м]}}} * \frac{(F/f)^2 + \delta}{\sqrt{1 - \left(\frac{F}{f}\right)^2}}, \quad (2)$$

f - значение частоты в ГГц, σ - удельная проводимость в см/м,

α_{np} - затухание волны, F - критическая частота:

$F = 182,8/a_{[мм]}$ - для волны H_{01} , $F = 87,85/a_{[мм]}$ - для волны H_{11} .

δ - параметр, учитывающий тип волны [7] -

$\delta = 0$ - для волны H_{01} , $\delta = 0,418$ - для волны H_{11} .

Результаты расчетов по формуле (2) представлены на рис.1-2, они характеризуют зависимость затухания волны H_{01} от частоты в дБ/км для разных внутренних диаметров и материала круглого волновода

Графики на рис. 1 – 2 представляют зависимость затухания волны H_{01} от частоты в дБ/км для разных внутренних диаметров и материала круглого волновода.

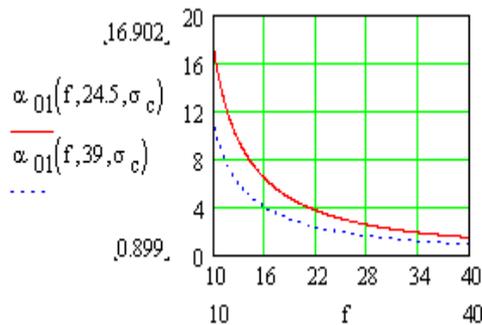


Рис1.

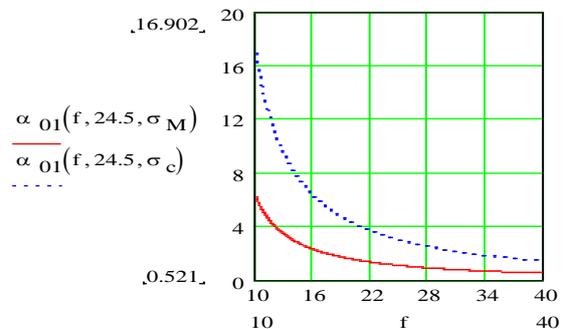


Рис.2.

Затухание волны H_{01} для диаметров труб 49, 78 мм Затухание H_{01} для труб из стали и меди

Как видно из рис.1. уже на частоте 22 ГГц затухание равно 4 дБ/км для трубы диаметром 49 мм и - 2 дБ/км для трубы диаметром 78 мм. С повышением частоты затухание уменьшается и на частоте 40 ГГц составляет соответственно 1,45 и 1,43 дБ/км. Графики на рис.2. характеризуют затухание волны H_{01} в круглых волноводах одного внутреннего диаметра (49 мм) из меди и стали. Из данных следует, что во всем диапазоне частот от 10 до 40 ГГц в стальном волноводе оно примерно в три раза больше, чем в медном. Затухание в стальном волноводе тех же диаметров волны основного типа H_{11} существенно выше: для трубы диаметром 78 мм затухание равно 7,4 дБ/км для оптимальной частоты 10,8 ГГц. С повышением частоты оно растет и уже на частоте 20 ГГц равно 8,2дб / км.

Были получены графики зависимости КПД передачи η_{nm} круглого стального волновода диаметром 45 мм от длины волновода x (км). КПД передачи рассчитывался по формуле:

$$\eta_{nm}(x, \gamma_{nm}) = 10^{-x \frac{\gamma_{nm}}{10}}, \quad (3)$$

где $\gamma_{\text{шт}}$ - затухание для конкретного значения диаметра трубы и материала: для волны H_{01} - $\gamma = 1,217$, а для волны H_{11} - $\gamma = 6,401$.

КПД характеризует относительную величину мощности, достигающей нагрузки, в зависимости от длины волновода. Расчёты показали, что на расстоянии 250 м КПД волны H_{11} составляет лишь 70%, в то время как КПД волны H_{01} уменьшается до 75% лишь на расстоянии 1 км. Для труб больших диаметров КПД будет еще выше. Для волны H_{11} КПД при длине 1 км равен 25%. То есть, при использовании H_{11} волны вместо H_{01} мощность СВЧ генератора придется увеличить примерно в пять раз. Были получены оценки возможной величины передаваемой мощности по рассматриваемым трубам с учетом пробоя. Для волны H_{11} $P_{\text{пред}} = 397$ кВт/см²; для волны H_{01} - 401 кВт/см². По данным работы [7] экспериментальные значения показателя затухания в медном волноводе почти во всем оптимальном диапазоне волны H_{01} превышает расчетное не более, чем в 2–3 раза.

Дополнительные потери за счет нефтяного загрязнения стенок волновода

Кроме рассмотренных выше потерь энергии, обусловленных конечной проводимостью стенок волновода, в НКТ добавятся потери в нефти, а также в стенках за счет нефтяных отложений. Так как данные о затухании ЭМВ в нефти в литературе отсутствовали, на базе ЦКБА (г. Омск) были проведены экспериментальные исследования, результаты приведен в статьях [8-10]. Для измерения затухания ЭМВ был использован панорамный измеритель КСВ Р2-54/3. Схема измерительной установки и методика проведения эксперимента представлена в работе авторов [8]. Были исследованы потери энергии и электродинамические свойства нефти и жидких нефтесодержащих материалов. Для определения электродинамических свойств нефти и жидких нефтесодержащих материалов (нефтяные отложения в скважинах, трубопроводах и т. п.) в диапазоне частот 2 – 18 ГГц в качестве волновода был использован отрезок коаксиальной линии, который имеет разбираемую конструкцию и полностью заполняется исследуемым веществом. Результаты эксперимента подтвердили теоретические выводы. Потери в нефтяных отложениях, как показывает анализ и результаты эксперимента, при $f > 5$ ГГц заметно превышают потери в чистой нефти, поэтому эти отложения будут нагреваться сильнее, чем чистая нефть. Данный эффект можно использовать для снижения вязкости нефти в нефтепроводе при транспортировке нефти, что в итоге уменьшит отложения на стенках нефтепровода.

Основные результаты и выводы

1. Оценены теоретические возможности использования стальных труб как линий передачи для дистанционного СВЧ нагрева и доказана возможность ликвидации нефтяных пробок.
2. Измерено дополнительное затухание ЭМВ в волноводах, обусловленное наличием воды, пара и нефтяным загрязнением стенок волновода в диапазоне 2-18 ГГц.
3. Предлагается в основу СВЧ нагрева нефти положить нагрев за счет потерь СВЧ энергии в стенках волновода. Для этого предлагается использовать для СВЧ нагрева частоты, максимально близкие к критическим для соответствующих типов волн круглого волновода.

Литература

1. Капица П.Л. Электроника больших мощностей. – М.: АН СССР, 1962.
2. Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного

- прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // ПМТФ, 1996. Т. 37, №3.-С. 75 – 82.
3. А.с. 1707190 СССР, МКИ 5 Е 21 В 43/00. Способ ликвидации ледяных, газогидратных и парафиновых пробок в выкидных линиях скважин и трубопроводов. Ахметов А.Т., А.И. Дьячук, А.А. Кислицын и др. // Открытия. Изобретения. 1992. №3.
 4. Майстренко В.А., Елецкий А. И., Денисов В.В. Оценка возможности дистанционного СВЧ нагрева // Омский научный вестник. – Вып. 2 (23), июнь. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2003. – С. 102–107.
 5. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. М., Связь, 1973, 480с., с ил.
 6. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. 336 с.
 7. В. А. Веников, Ю.П. Рыжов Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
 8. Елецкий А. И., Катунский Е. А., Богачков И. В. Предварительная оценка затухания электромагнитных волн за счет нефтяного загрязнения волновода // Омский научный вестник. – Вып. 2 (27), июнь. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2004. – С. 122–124.
 9. В. А. Майстренко, И. В. Богачков, А. И. Елецкий, Е. А. Катунский. Экспериментальные исследования электродинамических свойств жидких веществ в микроволновом диапазоне // Омский научный вестник. – Выпуск (1), 33. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – С. 98-102 .
 10. В. А. Майстренко, И. В. Богачков, А. И. Елецкий, Е. А. Катунский. Экспериментальные исследования электродинамических свойств нефти и нефтяных отложений в диапазоне 8 – 18 ГГц // Омский научный вестник. – Выпуск (2), 35. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – С. 148 - 150 .