

УДАЛЕНИЕ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В НЕФТЕПРОВОДАХ ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УВЧ-ДИАПАЗОНА

Г.А. Морозов¹, И.И. Нуреев¹, Т.Р. Шагвалиев¹, Р.Н. Валеев^{1,2}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева – КАИ
Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

²Центр технологического развития ПАО «Татнефть»
Российская Федерация, г. Альметьевск, ул. Тельмана, 88

Аннотация. Проблема образования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в нефтепроводах является одной из ключевых в современной нефтедобывающей и транспортной промышленности. В данной работе предлагается инновационный подход к решению проблемы удаления АСПО с использованием движущегося источника электромагнитного излучения УВЧ-диапазона, основанного на принципе диэлектрического нагрева. Исследование показывает, что применение электромагнитного излучения в диапазоне частот 900-2450 МГц позволяет осуществлять объемный нагрев отложений с высокой эффективностью, обеспечивая локальное повышение температуры до 60-150°C. Предложена математическая модель распространения электромагнитных волн в коаксиальной структуре нефтепровода, разработана конструкция антенной системы и проведено численное моделирование температурного поля.

Ключевые слова: асфальтосмолопарафиновые отложения, ультравысокочастотное излучение, диэлектрический нагрев, нефтепровод, антенная система, коаксиальный волновод.

Введение

Асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО) представляют собой сложную многокомпонентную систему, состоящую из парафиновых углеводородов, асфальтенов, смол и механических примесей. Образование АСПО приводит к значительному снижению пропускной способности трубопроводов, увеличению энергозатрат на транспортировку нефти и может вызвать полную блокировку трубопровода. До 70% добываемой нефти в России относится к категории трудно извлекаемых запасов с высоким содержанием парафинов и асфальтенов [1].

Механические методы удаления АСПО с использованием скребков и щеток эффективны, но требуют остановки транспортировки и не всегда обеспечивают полное удаление отложений. Химические методы основаны на применении органических растворителей и ингибиторов, однако их использование связано с высокими эксплуатационными затратами и экологическими рисками. Термические методы, включающие подачу горячей нефти или пара, энергоемки и малоэффективны для магистральных трубопроводов большой протяженности.

Электромагнитные методы нагрева представляют собой перспективную альтернативу традиционным технологиям благодаря их способности к объемному нагреву материалов с высокими диэлектрическими потерями. В отличие от конвективного и кондуктивного нагрева, при котором тепло передается от поверхности внутрь материала, электромагнитный нагрев обеспечивает прямое преобразование энергии электромагнитного поля в тепловую энергию в объеме отложений [2]. Это позволяет достичь высоких скоростей нагрева и обеспечить равномерное распределение температуры.

Применение движущегося источника излучения открывает новые возможности для непрерывной очистки трубопроводов без остановки транспортировки нефти. Такой подход позволяет последовательно обрабатывать различные участки трубопровода, обеспечивая постепенное удаление отложений по всей длине магистрали.

1. Теоретические основы электромагнитного нагрева АСПО

Диэлектрический нагрев основан на взаимодействии ультравысокочастотного электромагнитного поля с полярными молекулами диэлектрического материала. При воздействии переменного электрического поля полярные молекулы стремятся ориентироваться вдоль направления поля [3]. В ультравысокочастотном поле эти молекулы совершают непрерывные колебания, следя за изменением направления поля. Колебательное движение молекул приводит к их столкновениям с соседними молекулами, что вызывает преобразование электромагнитной энергии в тепловую энергию.

Объемная плотность мощности тепловыделения при диэлектрическом нагреве определяется выражением:

$$P_\vartheta = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2, \quad (1)$$

где P_ϑ – объемная плотность мощности тепловыделения ($\text{Вт}/\text{м}^3$), f – частота электромагнитного излучения (Гц), $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε'' – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости (фактор диэлектрических потерь), $|E|$ – напряженность электрического поля (В/м).

Диэлектрические свойства нефти и ее компонентов играют определяющую роль в процессе электромагнитного нагрева. Согласно исследованиям, относительная диэлектрическая проницаемость сырой нефти находится в диапазоне $\varepsilon'_r = 2.1 - 2.6$, а фактор диэлектрических потерь составляет $\tan \delta = 0.005 - 0.15$. Однако различные компоненты АСПО характеризуются существенно различающимися диэлектрическими свойствами.

Асфальтены, содержащие гетероатомы серы, азота и кислорода, обладают высокой полярностью и демонстрируют относительную диэлектрическую проницаемость в диапазоне $\varepsilon'_r = 5 - 18.4$. Смолы характеризуются промежуточными значениями $\varepsilon'_r = 3.8 - 5.1$. Парафиновые углеводороды, будучи неполярными соединениями, имеют низкую диэлектрическую проницаемость $\varepsilon'_r = 2.2 - 2.4$ [5].

Для промышленного применения электромагнитного нагрева используются выделенные частоты ISM-диапазона (Industrial, Scientific, Medical): 915 МГц (диапазон 902-915 МГц) и 2450 МГц (диапазон 2400-2500 МГц). Выбор рабочей частоты определяется требованиями к глубине проникновения излучения и эффективности нагрева.

Глубина проникновения электромагнитной волны в материал определяется выражением:

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon'_r \mu'_r}} \times \frac{1}{\sqrt{[\sqrt{1+\tan^2 \delta} - 1]}}. \quad (2)$$

Для нефти с типичными параметрами глубина проникновения на частоте 915 МГц составляет приблизительно 1.5-2 м, в то время как на частоте 2450 МГц она уменьшается до 0.6-0.8 м.

Более низкие частоты обеспечивают большую глубину проникновения, что благоприятно для нагрева толстых слоев отложений. Однако на более высоких частотах достигается более высокая плотность мощности нагрева при тех же значениях напряженности поля. Для эффективного нагрева АСПО в трубопроводах с диаметром 300-500 мм рекомендуется использовать частоту 915 МГц, обеспечивающую достаточную глубину проникновения для равномерного объемного нагрева [6-7].

2. Моделирование процесса электромагнитного нагрева

Нефтепровод может рассматриваться как круглый волновод, в котором распространяются электромагнитные волны различных типов. Для коаксиальной конфигурации, в которой антенна расположена вдоль оси трубопровода, характерно возбуждение основной моды ТЕМ (поперечной электромагнитной волны) и высших мод ТЕ и ТМ [8].

Распространение электромагнитной волны в цилиндрической системе координат описывается уравнениями Максвелла. Для гармонического поля можно получить волновое уравнение Гельмгольца для электрического поля:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0, \quad (3)$$

где $k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r^* \mu_0 \mu_r}$ – комплексное волновое число.

Распределение температуры в нагреваемом объеме описывается нестационарным уравнением теплопроводности с объемным источником тепла:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + P_v, \quad (4)$$

где ρ – плотность материала ($\text{кг}/\text{м}^3$), C_p – удельная теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$), T – температура (К), t – время (с), k – теплопроводность ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$).

При движении антенны внутри трубопровода со скоростью v в каждой точке пространства происходит нестационарный нагрев. Источник тепла в неподвижной системе координат может быть представлен в виде:

$$P_\vartheta(r, z, t) = P_{vo}(r) \cdot f(z - vt), \quad (5)$$

где $P_{vo}(r)$ – радиальное распределение плотности мощности, $f(z - vt)$ – функция, описывающая продольное распределение излучения антенны и ее перемещение.

Для возбуждения электромагнитных волн в трубопроводе могут использоваться различные типы антенн [9]. Коаксиальный монопольный излучатель представляет собой простую конструкцию, в которой центральный проводник коаксиального кабеля выступает в качестве излучающего элемента. Такая антenna создает омнидирикциональную диаграмму направленности в поперечной плоскости.

Оптимальной конфигурацией для нефтепровода является коаксиальная структура, в которой центральная антenna окружена цилиндрическим диэлектрическим кожухом, а внешним проводником служит металлическая стенка трубопровода [10].

Для численного моделирования использовался метод конечных элементов. Рассматривался участок нефтепровода длиной 20 м и внутренним диаметром 300 мм со слоем АСПО толщиной 10 мм на внутренней стенке. Антenna длиной 10 м располагалась коаксиально вдоль оси трубопровода. Рабочая частота 915 МГц, мощность излучения 5 кВт.

Напряженность электрического поля существенно возрастает при приближении к центральной антенне (рис. 1). На радиусе антенны поле достигает максимального значения 192 В/м. Логарифмическая зависимость поля от радиуса отражает геометрию коаксиальной структуры.

Температура возрастает по экспоненциальному закону, асимптотически приближаясь к установившемуся значению 22.1°C (рис. 2).

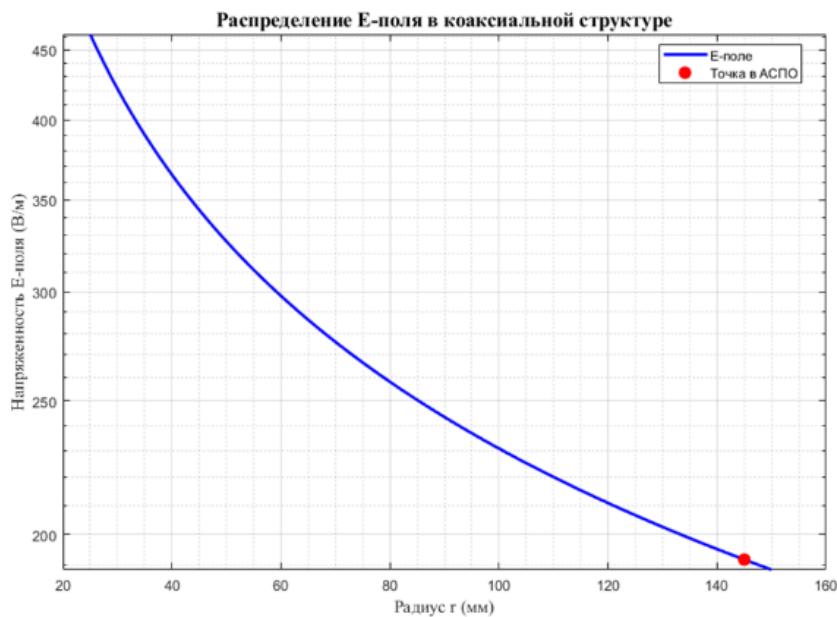


Рис. 1. Распределение Е-поля по радиусу

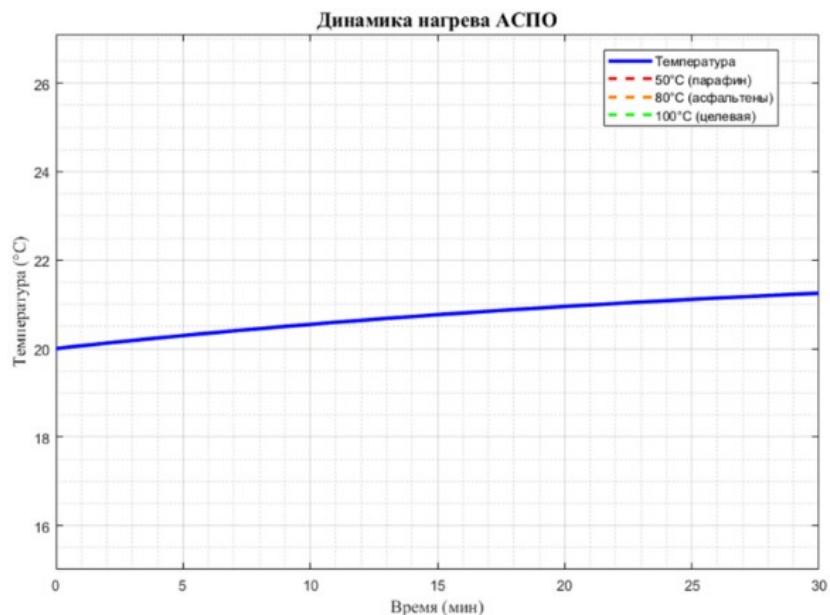


Рис. 2. Динамика температуры во времени

Такое низкое значение объясняется малой толщиной слоя АСПО и его хорошей теплопроводностью. На практике для более толстых слоев отложений температура будет значительно выше.

Плотность мощности тепловыделения увеличивается по мере приближения к центральной антенне (рис. 3). Максимальное значение ~ 2.1 кВт/м³ достигается в непосредственной близости от антенны, что обеспечивает интенсивный нагрев в этой области.

Температура в слое АСПО повышается от внешней стенки к центру, максимум достигая вблизи поверхности антенны. Неравномерность распределения температуры определяется радиальным распределением электромагнитного поля (рис. 4).

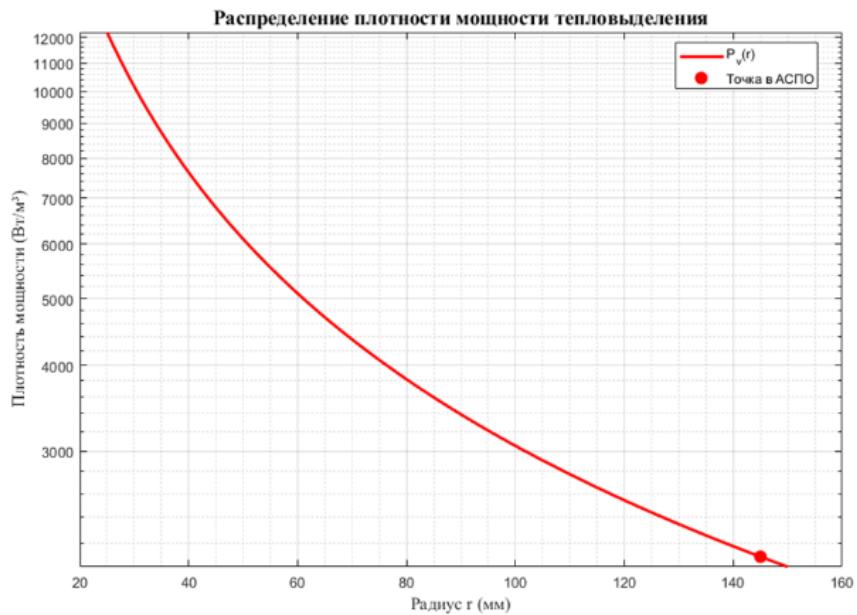


Рис. 3. Объемная плотность мощности

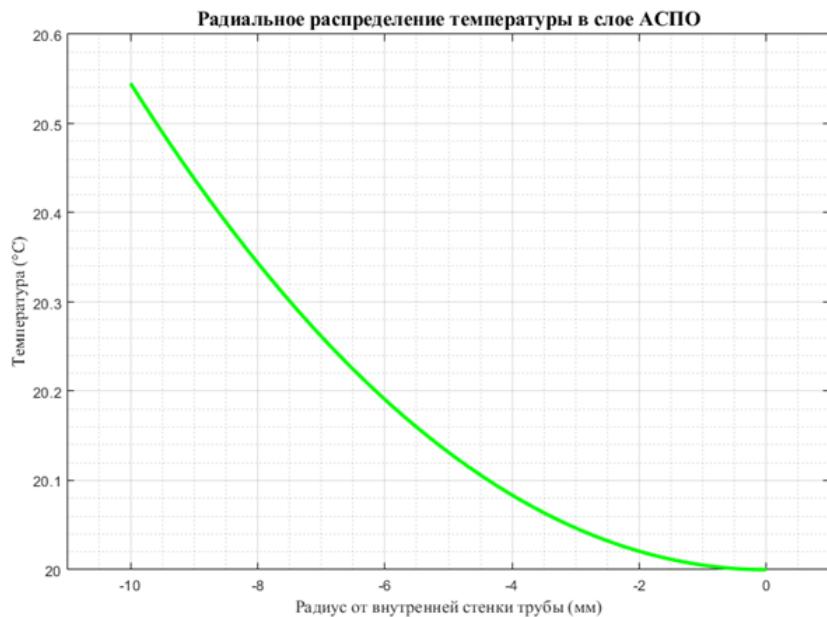


Рис. 4. Объемная плотность мощности

Контурный график показывает распределение амплитуды Е-поля в координатах (продольная позиция z , радиальная координата r). Поле демонстрирует стоячую волну вдоль оси трубопровода, что характерно для коаксиальной конфигурации с отражением от торцов (рис. 5). Максимум температуры наблюдается близко к поверхности антенны, а по мере удаления от нее температура постепенно снижается.

При увеличении мощности излучения время нагрева до целевой температуры значительно сокращается. Зависимость близка к гиперболической, что отражает нелинейность теплового процесса.

Время воздействия антенны на участок трубопровода обратно пропорционально скорости движения (рис. 6). Для эффективной очистки требуется достаточно время нагрева отложений.

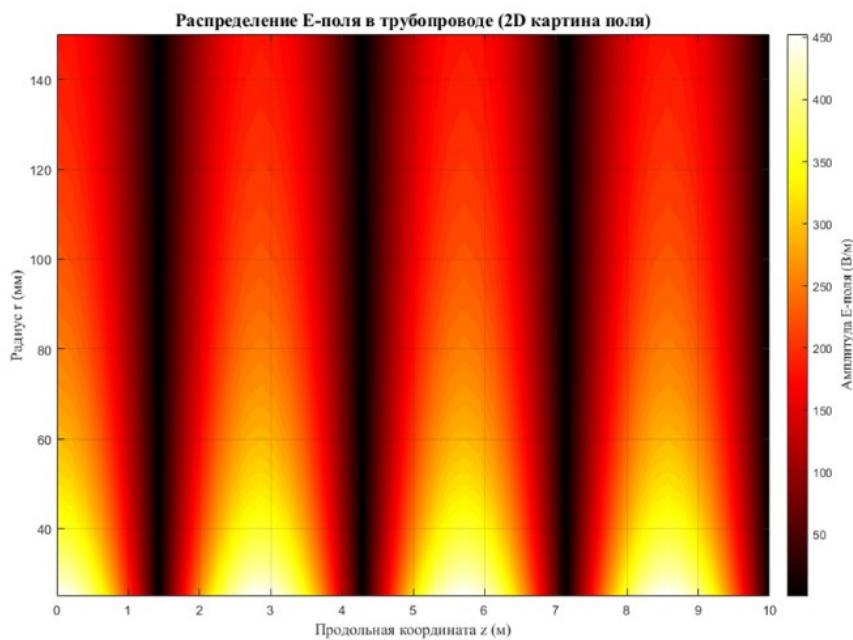


Рис. 5. 2D картина электромагнитного поля

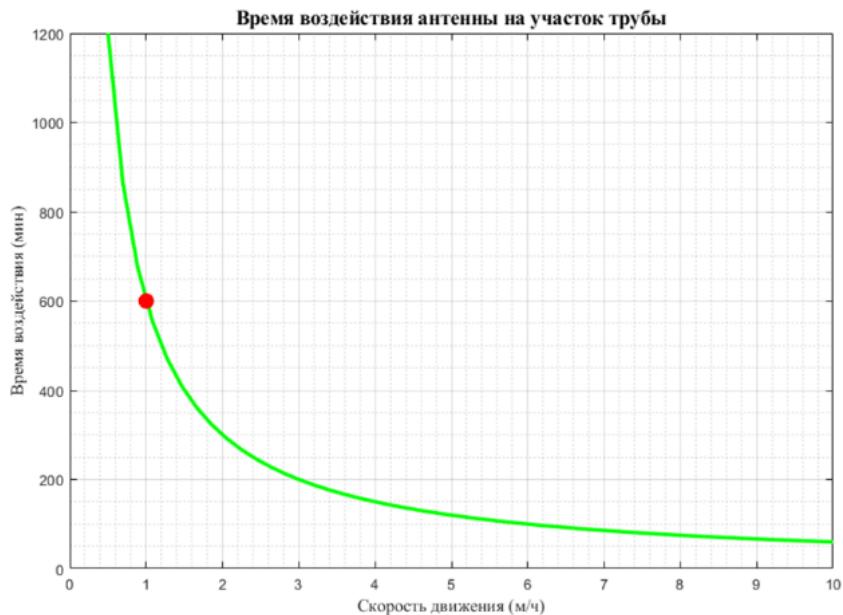


Рис. 6. Время воздействия в зависимости от скорости движения

Заключение

В работе представлен комплексный подход к решению проблемы удаления АСПО в нефтепроводах с использованием движущегося источника ультравысокочастотного электромагнитного излучения. Проведенный анализ механизма диэлектрического нагрева и диэлектрических свойств компонентов АСПО показал возможность эффективного преобразования электромагнитной энергии в тепловую энергию.

Разработана математическая модель распространения электромагнитных волн в коаксиальной структуре нефтепровода и нестационарного температурного поля при движении источника излучения. Численное моделирование подтвердило возможность

достижения необходимых температур для плавления парафинов и разрушения асфальтеновых структур. Предложенная конструкция антенной системы на основе коаксиальной конфигурации обеспечивает эффективное возбуждение электромагнитного поля и защиту излучающих элементов от агрессивной среды.

Результаты исследования открывают новые возможности для повышения эффективности трубопроводного транспорта нефти, снижения эксплуатационных затрат и улучшения экологической безопасности нефтедобывающей промышленности. Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальную проверку разработанных подходов и создание опытно-промышленных образцов оборудования.

Список использованных источников

1. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации): монография / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, Ю.Е. Седельников и др.; под редакцией Г.А. Морозова, Ю.Е. Седельникова. – Москва: Радиотехника, 2003. – 111с.
2. Шагвалиев Т. Р. Добыча сверхвязкой нефти методом СВЧ нагрева / Т.Р. Шагвалиев // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. – 2019. – С. 119-124.
3. Морозов Г. А. Современные подходы к построению адаптивных СВЧ технологических комплексов обработки высоковязких водонефтяных смесей / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, Я. Н. Шангараева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15. – №. 4. – С. 59-66.
4. Zhao X. Comprehensive Review: Research and Application of Microwave Heating Technology in In Situ Exploitation of Oil Shale / X. Zhao // ACS omega. – 2025. – Т. 10. – №. 20. – С. 20059-20077.
5. Todjiyeva G. Development of asphalt-resin-paraffin deposits solvent / G. Todjiyeva et al. // Technical science and innovation. – 2021. – Т. 2021. – №. 4. – С. 4-10.
6. Tanhaei H. Improvement of the quality of heavy crude oil and reducing the concentration of asphaltene hydrocarbons using microwave radiation during acidizing / H.Tanhaei, A. H. Saeedi Dehaghani //Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – №. 1. – С. 7434.
7. Liao H. Effect of crude oil composition on microwave absorption of heavy oils / H. Liao, M.Morte, B.Hascakir // SPE Western Regional Meeting. – SPE, 2019. – С. D022S019R007.
8. Самигуллин Р. Р. СВЧ анализаторы фракционного состава сырой нефти: анализ состояния, определение направлений, методов и средств совершенствования / Р. Р. Самигуллин и др. // Вопросы электротехнологии. – 2014. – №. 3. – С. 49-56.
9. Shang H. Effect of microwave irradiation on the viscosity of crude oil: A view at the molecular level / H. Shang et al.// Fuel Processing Technology. – 2018. – Т. 170. – С.44-52.
10. Веденькин Д. А. Лабораторный комплекс по переработке нефтесодержащих отходов с применением СВЧ технологий / Д. А. Веденькин и др. // Вопросы электротехнологии. – 2014. – №. 3. – С. 4.

REMOVAL OF ASPHALT-RESIN-PARAFFIN DEPOSITS IN OIL PIPELINES USING A MOVING ULTRA-HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC RADIATION SOURCE

G.A. Morozov¹, I.I. Nureyev¹, T.R. Shagvaliev¹, R.N. Valeev^{1,2}

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
10, K. Marx St., Kazan, Russian Federation

²Technological Development Center of PJSC “Tatneft”
88, Telman St., Almetyevsk, Russian Federation

Abstract. The formation of asphalt-resin-paraffin deposits (ARPD) in oil pipelines is a key issue in the modern oil production and transportation industries. This paper proposes an innovative approach to solving the problem of ARPD removal using a moving ultra-high-frequency electromagnetic radiation source based on the principle of dielectric heating. The study demonstrates that the use of electromagnetic radiation in the 900-2450 MHz frequency range enables volumetric heating of deposits with high efficiency, providing a localized temperature increase of up to 60-150°C. A mathematical model for electromagnetic wave propagation in the coaxial structure of an oil pipeline is proposed, an antenna system design is developed, and numerical modeling of the temperature field is conducted.

Keywords: asphaltene-resin-paraffin deposits, ultra-high-frequency radiation, dielectric heating, oil pipeline, antenna system, coaxial waveguide.

Статья представлена в редакцию 30.09.2025 г.