УДК 517.958

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ АСФАЛЬТО-ПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ТРУБЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

В.И. АНФИНОГЕНТОВ, С.Р. ГАНИЕВА

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева
E-mail: v.anfinogentov@yandex.ru

NUMERICAL SIMULATION OF MELTING ASPHALT-PARAFFIN DEPOSITS IN THE PIPE UNDER THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION

V.I. ANGINOGENTOV, S.R. GANIEVA

Kazan National Research Technical A.N. Tupolev University, Kazan

Аннотация

Исследуется процесс СВЧ нагрева и плавления твердых отложений в трубе с учетом зависимости коэффициента затухания электромагнитной волны от температуры, порождающей нелинейность объемного источника тепла. Для решения нелинейной краевой задачи с фазовым переходом используется метод сквозного счета по неявной разностной схеме, построенной интегральным методом. Приводятся результаты численных расчетов.

Ключевые слова: Математическая модель, СВЧ нагрев, плавление, асфальто-парафиновые отложения, фазовый переход.

Summary

The report explores the process of microwave heating and melting of solids in the pipe, taking into account the dependence of the attenuation of the electromagnetic wave on the temperature generated by nonlinear volumetric heat source. For the solution of nonlinear boundary-value problem with the phase transition method is used shock-capturing method of implicit difference scheme, built by the integral method.The results of numerical calculations.

Key words: Mathematical model, microwave heating, melting, asphalt-paraffin deposits, phase transformation.

Введение

В процессе эксплуатации нефтяных скважин и перекачки нефти по трубопроводам вследствие понижения температуры и давления образуются асфальто-парафиновые отложения (АСПО), которые в ряде случаев полностью заполняют пространство внутри трубы, что приводит к остановке скважины. Как показывают результаты лабораторных исследований один из перспективных методов борьбы с образованием пробок - применение высокочастотного электромагнитного нагрева и плавления. Преимущество такого способа нагрева перед обычными способами (горячей водой, электронагревателем и т.п.) заключается, во-первых, в объемном нагреве пробки, т.е. в значительно более быстром и равномерном по объему нагреве, а во-вторых, в отсутствии теплоносителя, что позволяет легко управлять процессом разогрева [1—3].

1. Постановка задачи

Приемлемой моделью для анализа СВЧ нагрева может служить представление трубы в виде цилиндрического волновода. При моделировании предполагалось, что АСПО полностью заполняет цилиндрический волновод и в волноводе возбуждается либо единственный тип волны, например, E_{01} или H_{11}, либо их комбинация. При математическом моделировании СВЧ нагрева АСПО в трубе учитывались изменения температуры вдоль трубы за счет теплопроводности. Вследствие поглощения излучения в диэлектрике происходит его объемный разогрев и плавление. Процесс прогрева описывается уравнением теплопроводности

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\left(\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+Q\left(r,z,t\right),t>0,0<r<r_0,0<z<h$$

где $Q\left(r,z,t\right)$ – функция тепловых потерь, пропорциональная квадрату модуля напряженности электрического поля в диэлектрике.

Граничные условия выбирались в следующем виде:

на оси трубы выполняется условие симметрии

$$\frac{\partial T}{\partial r}\left(0,z,t\right)=0,$$

на стенке $(r=r_0)$ задается условие третьего рода

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\left(r_0,z,t\right)=\varkappa\left(T\left(r_0,z,t\right)-T_s\right),$$

на концах трубы задается условие теплоизоляции $\frac{\partial T}{\partial z}\left(r,0,t\right)=0$ *и* $\frac{\partial T}{\partial z}\left(r,h,t\right)=0.$

Начальное условие $T(r,z,0)=T_0$. Здесь $\varkappa$ – коэффициент теплообмена на боковой поверхности трубы, T_0 – начальная температура АСПО, а T_s – температура окружающей среды.

После достижения температуры плавления АСПО в трубе образуется жидкий слой переменной толщины. Математическая постановка задачи примет следующий вид:

$$c_i\rho_i\frac{\partial T_i}{\partial t}=\lambda_i\left(\frac{1}{r}\frac{\partial T_i}{\partial r}+\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2}+\frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}\right)+Q_i\left(r,z,t\right),i=1,2.$$

Здесь $i=1$ соответствует жидкой фазе АСПО, а $i=2$ соответствует твердой фазе.

На границе фазового перехода кроме условия равенства температур твердой и жидкой фаз температуре плавления задавалось условие Стефана

$$\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial n}-\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial n}=\rho_2 L v_n,T_1=T_2=T_{melt}.$$

Здесь v_n – нормальная компонента скорости перемещения фазового фронта. Нелинейность задач с фазовыми переходами обусловлена, прежде всего, наличием неизвестной (свободной) границы фазового перехода. Так как положение границы фазового перехода заранее не известно и должно быть найдено в процессе решения уравнений теплопроводности, то условие Стефана, делает задачу нелинейной. Кроме того, как и в обычных задачах теплопроводности, нелинейность может быть связана с зависимостью теплофизических параметров от температуры. Для того, чтобы подчеркнуть особенности задач с фазовыми переходами будем считать жидкую и твердую фазы однородными средами с постоянными теплофизическими параметрами.

Для решения задачи методом конечных разностей в трехмерной области

$$[0\leqslant r\leqslant r_0\times 0\leqslant z\leqslant H\times 0\leqslant t\leqslant T_{end}]$$

вводится равномерная по координатам r, z и t пространственная сетка $r_i=(i-1)\cdot\Delta r$, $i=1,2,\ldots,n_r$,, $z_j=(j-1)\cdot\Delta z$, $j=1,2,\ldots,n_z$, $t_k=(k-1)\cdot\Delta t$, $k=1,2,\ldots,n_t$, где $\Delta r=r_0/(n_r-1)$, $\Delta z=H/(n_z-1)$, $\Delta t=T_{end}/n_k$.

Интегро-интерполяционным методом построена консервативная разностная схема, представляющая систему нелинейных уравнений относительно значений температуры на текущем и предыдущем временных слоях. Задача решалась методом сквозного счета [4].

2. Выводы

В докладе приведены результаты вычислительных экспериментов, которые позволяют сделать следующие выводы.

1. Возбуждение в трубе единственного типа волны приводит к существенной неравномерности функции тепловых потерь в поперечном сечении трубы, что вызывает неравномерность распределения температуры. На стенке и на оси температура АСПО заметно меньше (на $5-15^0C$), чем на расстоянии от оси примерно равном половине радиуса.

2. Эффективность СВЧ нагрева и плавления существенно зависит от частоты электромагнитного поля. С увеличением частоты при одинаковой амплитуде возрастает и неравномерность распределения температуры вдоль оси трубы, что обусловлено уменьшением глубины проникновения электромагнитной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абдуллина В.А., Фатыхов М.А.** Расплавление твердых отложений в трубопроводах движущимся источником электромагнитного поля// Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело" . — 2012. — № 6 — С. 60-68. `http://www.ogbus.ru`
2. **Анфиногентов В.И., Ганиева С.Р.** Математическое моделирование СВЧ нагрева вязких жидкостей в трубопроводе // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — Т. 17, № 2. — С. 123–127.
3. **Балакирев В.А., Сотников Г. В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю.** Разрушение асфальто-парафиновых пробок в нефтяных трубопроводах перемещающимся источником ВЧ-излучения // Материалы 10-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, Украина, 2000. — С. 596.
4. **Самарский А.А., Моисеенко Б.Д.** Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана//ЖВМ и МФ. — 1965. — № 5. — С 255–258.

REFERENCES

1. **Abdullina V.A. and Fatykhov M.A.** Melting of solids in pipelines by moving source electromagnetic field [Rasplavlenie tverdykh otlozheniy v truboprovodah dvizhuschimsya istochnikom elektromagnitnogo polya] // Elektronniy nauchniy zhurnal «Neftegazovoe delo». — 2012. — №6. — P. 60–68. http://www.ogbus.ru. (in Russian)
2. **Anfinogentov V.I. and Ganieva S.R.** Mathematical modeling of microwave heating of viscous liquids in the pipeline [Matematicheskoe modelirovanie SVCH nagreva vyazkhikh zhidkostey v truboprovode] // Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta. — 2014. — V. 17, № 2. — P. 123–127. (in Russian)
3. **Balakhirev V.A., Sotnikhov G.V., Tkach U.V., Yatzenko T.U.** Destruction of asphalt-paraffin plugs in oil pipelins by moving sourse of high-frequency radiation [Razrusheniye asfalto-parafinovykh probok v neftyanykh truboprovodakh peremeshyaushimsya istoshnikom VCH-izlucheniya] // Materialy 10 mezhdunarodnoiy Krymskoiy konferenciyi, «SVCH–tekhnika i telekhomunikhatsionniye tekhnologii», Sevastopol, Ukraina, 2000. — P. 596.
4. **Samarskii A.A. and Moiseenko B.D.** An economic continuous calculation scheme for the Stefan multidimensional problem // USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 1965. — V. 5, № 5. — P. 43–58.