



УДК 532.516.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫСОКОВЯЗКИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Л. А. Ковалева, В. Н. Киреев, А. А. Мусин

Башкирский государственный университет, Уфа
Институт механики УНЦ РАН, Уфа

Аннотация. В работе проводится численное моделирование процесса нагрева высоковязкой углеводородной жидкости, вязкость и теплопроводность которой зависят от температуры. Решается система уравнений свободной конвекции в линейном приближении Буссинеска. Исследована динамика изменения температурного поля и конвективных структур в жидкости.

Ключевые слова: углеводородная жидкость, индукционный нагрев, свободная конвекция, математическое моделирование

1 Введение

Углеводородная жидкость (нефтьшлам) представляет собой тяжелую углеводородную систему, при низких температурах практически не текучую и слабо теплопроводную. Примерами таких жидкостей являются нефтяной битум, высоковязкие нефти, продукция так называемых нефтяных амбаров, а также остатки нефтепереработки, осевшие на дне резервуаров. Вследствие сильной зависимости вязкости этих жидкостей от температуры, в процессе нагрева в среде возможно возникновение различных конвективных потоков. При естественной конвекции у нагретых тел основные теплофизические процессы развиваются в тонком пограничном слое толщиной в несколько миллиметров, в котором претерпевают существенные

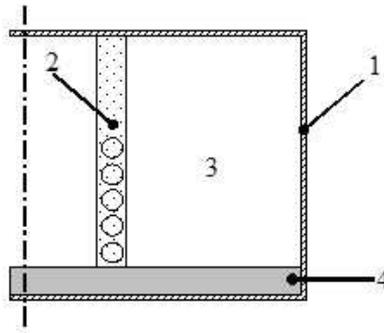


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — металлическая емкость; 2 — труба индуктора; 3 — углеводородная жидкость; 4 — слой бетона

изменения и физические свойства жидкости. Результаты экспериментальных исследований нагрева тяжелых углеводородных систем при помощи индукционного нагревателя приведены в работе [1].

В данной работе приведены результаты численного моделирования процесса индукционного нагрева углеводородной жидкости с учетом конвекции жидкости.

2 Математическая модель

Рассмотрим замкнутую металлическую емкость, основание которой покрыто слоем бетона, а в центре расположена труба индуктора. Пространство между трубой индуктора и внешней стенкой емкости заполнено высоковязкой углеводородной жидкостью (Рис. 1). С помощью индукционного нагревателя на части стенки трубы индуктора выделяется тепло, за счет которого происходит нагрев жидкости.

Выберем цилиндрическую систему координат, начало которой находится в центре нижнего основания емкости, а ось z направлена вверх по оси емкости. Рассмотрим задачу в аксиально-симметричной постановке.

Распространение тепла в стенке трубы индуктора описывается уравнением теплопроводности вида:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_m}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_m \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q, \quad (1)$$

где ρ_m, k_m, c_m — плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость металла; q — плотность распределенных источников тепла, создаваемых индуктором.

В слое бетона уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho_b c_b \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_b}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_b \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где ρ_b, k_b, c_b — плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость бетона соответственно.

Конвективное движение углеводородной жидкости описывается системой уравнений тепловой конвекции в линейном приближении Буссинеска [2]:

$$\rho_f \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ruu)}{\partial r} + \frac{\partial(vu)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta_f \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_f \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \eta_f \frac{u}{r^2}, \quad (3)$$

$$\rho_f \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ruv)}{\partial r} + \frac{\partial(vv)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta_f \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_f \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \beta \rho_f g T', \quad (4)$$

$$\rho_f c_f \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ruT)}{\partial r} + \frac{\partial(vT)}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_f \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

где ρ_f, k_f, η_f, c_f — плотность, коэффициент теплопроводности, коэффициент динамической вязкости и удельная теплоемкость углеводородной жидкости; u, v — компоненты скорости теплового движения жидкости вдоль осей r и z ; P — давление; β — коэффициент теплового расширения жидкости; g — ускорение свободного падения; T' — перепад температур.

Зависимость коэффициента теплопроводности жидкости от температуры принята линейной:

$$k_f(T) = k_{f0} [1 + b(T - T_0)].$$

Вязкость углеводородной жидкости также зависит от температуры: использовалась аппроксимированная зависимость вязкости от температуры в виде двух экспонент, полученная экспериментальным путем в статье [1]:

$$\eta(T) = \begin{cases} \eta_{01} \exp(-\gamma_1(T - 35.5)), & 35.5^\circ\text{C} < T < 54.2^\circ\text{C}, \\ \eta_{02} \exp(-\gamma_2(T - 54.2)), & 54.2^\circ\text{C} < T < 75^\circ\text{C}, \end{cases}$$

где $\eta_{01} = 1460$ Па·с — вязкость углеводородной жидкости при температуре 35.5°C ; $\eta_{02} = 0.228$ Па·с — вязкость углеводородной жидкости при температуре 54.2°C ; $\gamma_1 = 0.497$ K^{-1} — температурный коэффициент в диапазоне $T = 35.5 \div 54.2^\circ\text{C}$; $\gamma_2 = 0.031$ K^{-1} — температурный коэффициент в диапазоне $T > 54.2^\circ\text{C}$.

В начальный момент времени жидкость покоится и установка имеет постоянную температуру. Для скорости на всех твердых стенках задаются условия прилипания. На верхней поверхности емкости задается теплообмен с окружающей средой по закону свободной конвекции в неограниченном пространстве. Внешняя стенка емкости и ее нижнее основание теплоизолированы. На внутренней поверхности трубы индуктора задается теплообмен с воздухом в замкнутом пространстве. На остальных границах слоев принимается равенство температур и тепловых потоков.

3 Результаты вычислений

Система уравнений (1–6) с соответствующими краевыми условиями решалась численно, методом контрольного объема с использованием алгоритма SIMPLE [3]. При решении использовались геометрические размеры экспериментальной установки и параметры среды, приведенные в работе [1].

В начальный момент времени температура углеводородной жидкости такова, что она имеет высокую вязкость и является практически нетекучей. Поэтому в течение достаточно длительного времени после начала индукционного нагрева перенос тепла в жидкости происходит только за счет молекулярной теплопроводности. По мере роста температуры жидкости ее вязкость уменьшается, и в верхней части емкости возникает зона конвективного течения. На Рис. 2 показаны поля температуры и линии тока в различные моменты времени. Хорошо видно, что область интенсивного конвективного перемешивания увеличивается, но тем не менее остается и высоковязкая область, в которой движение отсутствует.

Наглядное представление о динамике распространения температурного фронта в жидкости дает Рис. 3, на котором показано распределение температуры в центральном горизонтальном сечении в различные моменты времени. Вблизи стенки трубы индуктора температура резко уменьшается в тонком пограничном слое. Это можно объяснить наличием у стенки конвективного течения, направленного снизу вверх, которое приносит более холодную жидкость.

Стационарные термограммы в вертикальных сечениях, находящихся на разных расстояниях от оси емкости, приведены на Рис. 4. В верхней части емкости температура жидкости достаточно однородна, тогда как в нижней части сохраняется значительная дифференциация температуры.

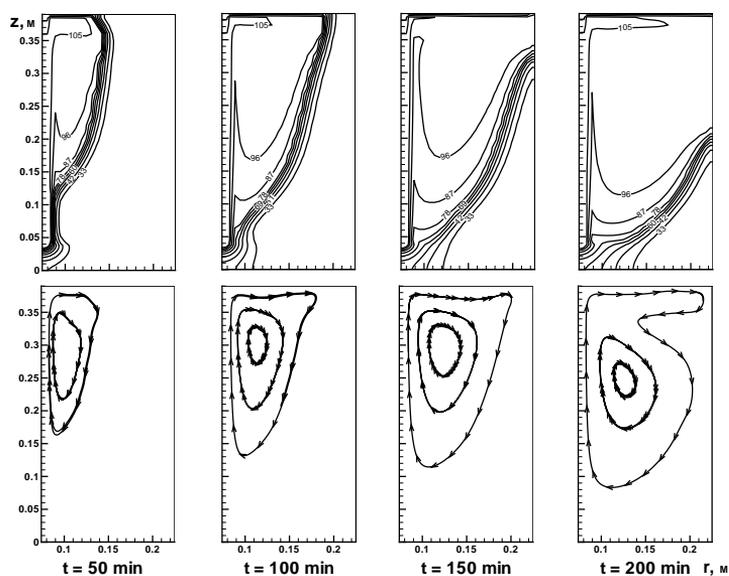


Рис. 2. Температурное поле и линии тока в различные моменты времени

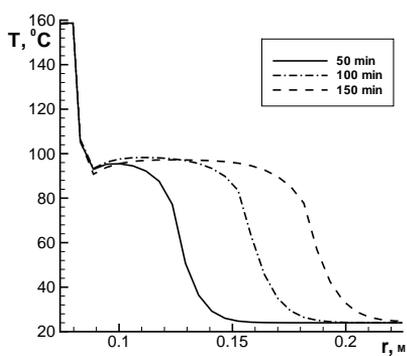


Рис. 3. Распределение температуры в центральном горизонтальном сечении в различные моменты времени

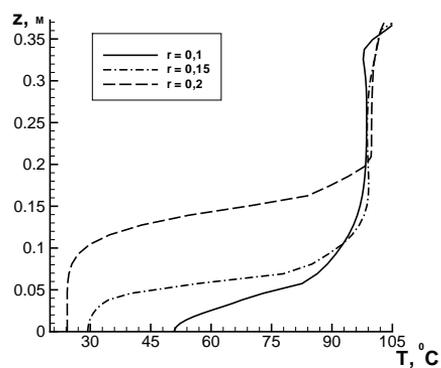


Рис. 4. Стационарные термограммы в различных вертикальных сечениях

4 Заключение

В данной работе получена математическая модель, описывающая конвективное движение углеводородной жидкости в процессе индукционного нагрева. Показано, что вследствие зависимости вязкости и теплопроводности жидкости от температуры процесс распространения тепла имеет сложный характер. В течение длительного времени основное движение происходит в верхней части емкости. При этом в жидкости образуются две резко различающиеся по температуре области, которые разделяет узкая переходная зона (явление термоклина).

Список литературы

- [1] Ковалева Л. А., Насыров Н. М., Максимочкин В. И., Суфьянов Р. Р. Изучение теплопроводности высоковязких углеводородных систем методом экспериментального и математического моделирования // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 6. С. 96–102.
- [2] Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
- [3] Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.