

УДК 536.22:621.365.5

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЫСОКОВЯЗКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Л. А. Ковалева, Н. М. Насыров, В. И. Максимочкин*, Р. Р. Суфьянов

Башкирский государственный университет, 450074 Уфа

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119992 Москва

E-mails: liana@ic.bashedu.ru, nasirovnm@ic.bashedu.ru, maxvi@mail.ru, sufyanovrr@ic.bashedu.ru

Разработана математическая модель и проведены численные исследования нагрева тяжелых углеводородных систем. Выполнен сопоставительный анализ численных расчетов и результатов экспериментальных исследований. Установлено, что при нагреве исследуемой углеводородной системы от начальной температуры 24 °С до 100 °С теплопроводность увеличивается в 40 раз, а с учетом свободной конвекции наблюдается дополнительное многократное (до 16 раз) увеличение переноса тепла за счет роста эффективной теплопроводности.

Ключевые слова: теплопроводность, свободная конвекция, сложный теплообмен, индукционный нагрев, углеводородная жидкость.

Введение. Значения теплопроводности капельных жидкостей находятся в пределах 0,08–0,7 Вт/(м·К) и, как правило, считаются слабо зависящими от температуры [1]. Однако известно, что при достаточно больших градиентах температуры возможно возникновение различных конвективных потоков и режимов турбулизации жидкости. При этом ее эффективная теплопроводность становится гораздо выше молекулярной. Поэтому такая жидкость в тепловом отношении будет представлять собой аналог весьма теплопроводного твердого тела. Эффективная теплопроводность жидкостей может быть оценена в пределах [2] $960 < \lambda_{eff}/\lambda < 1500$. Здесь λ и λ_{eff} — молекулярная и эффективная теплопроводности соответственно.

Как известно, турбулентное течение характеризуется быстрыми нерегулярными изменениями скорости, вызывающими весьма интенсивное перемешивание потока [3]. В результате этого потоки массы, импульса и энергии оказываются обусловленными именно турбулентным перемешиванием, а молекулярный перенос на его фоне становится очень малым. В работе [4], в которой экспериментально исследовалась конвекция в наклонных стеклянных цилиндрических трубах, заполненных водой, обнаружен резкий пороговый эффект: по достижении определенной мощности подогрева с нижнего конца и установлении некоторого градиента температуры внезапно возникает заметное движение жидкости. При этом осевой теплоперенос увеличивается и может достигнуть значений, превышающих молекулярную теплопередачу в 2500 раз.

В описанных ниже экспериментах обнаружено резкое увеличение эффективной теплопроводности при нагреве высоковязких углеводородных жидкостей, при низких температурах практически нетекучих и слаботеплопроводных. Примерами таких жидкостей являются нефтяной битум, высоковязкие нефти, продукция так называемых нефтешламных амбаров или остатки нефтепереработки, осевшие на дне резервуаров.

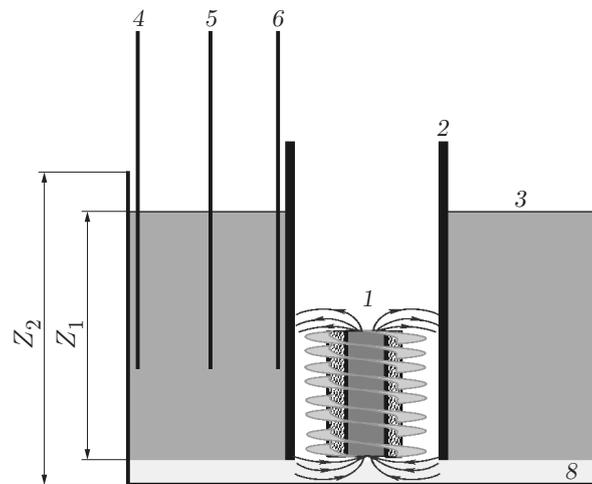


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — катушка индуктора; 2 — труба индуктора; 3 — углеводородная жидкость; 4, 5, 6 — термопары; 7 — емкость; 8 — бетон

Экспериментальные исследования. В лабораторных условиях моделировался резервуар, заполненный углеводородной жидкостью (нефтешламом), разогрев которой осуществлялся с помощью специально разработанного индукционного нагревателя (рис. 1).

Экспериментальная модель состоит из металлической емкости, основание которой покрыто слоем бетона толщиной 40 мм. Емкость высотой 470 мм и диаметром 450 мм заполнена высоковязкой, первоначально нетекучей углеводородной жидкостью до уровня 350 мм от поверхности бетона. Высота индуктора 250 мм, диаметр 128 мм. Высота трубы индуктора 500 мм, внутренний диаметр 148 мм, внешний 160 мм. Труба индуктора расположена в центре емкости и превышает уровень поверхности углеводородной жидкости на 150 мм. В процессе эксперимента индуктор подключался к электросети напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Выходная мощность составляла $N_0 = 1224$ Вт. Измерения температуры производились тремя термопарами, расположенными на высоте 170 мм от основания емкости, на расстояниях 10, 60 и 110 мм от стенки трубы индуктора. Показания термопар фиксировались через каждые пять минут. Начальная температура $T_0 = 24$ °С.

Результаты экспериментов показаны на рис. 2. Фиксированные значения температуры отмечены точками.

Молекулярная теплопроводность при начальной температуре мала. Вследствие этого заметный рост температуры с начала нагрева фиксируется только первой термопарой: через 5 мин температура поднялась до 28 °С, через 10 мин — до 38 °С и далее с ускорением повышалась до достижения 93 °С, после чего рост температуры практически прекратился. Температура в точке установки второй термопары начала заметно увеличиваться через 35 мин после начала нагрева, когда показания первой термопары уже стабилизировались. Рост температуры в месте установки второй термопары сравнительно более плавный, так как тепло от индуктора передавалось большему объему среды. Рост показаний третьей термопары наблюдался через 140 мин после начала нагрева и был еще более плавным, чем у второй термопары. Данные рис. 3 свидетельствуют об очень сильной зависимости эффективной теплопроводности нефтешлама от температуры [1, 5], а также о том, что, начиная с некоторой температуры (в эксперименте — 93 °С), эффективная теплопроводность резко увеличивается.

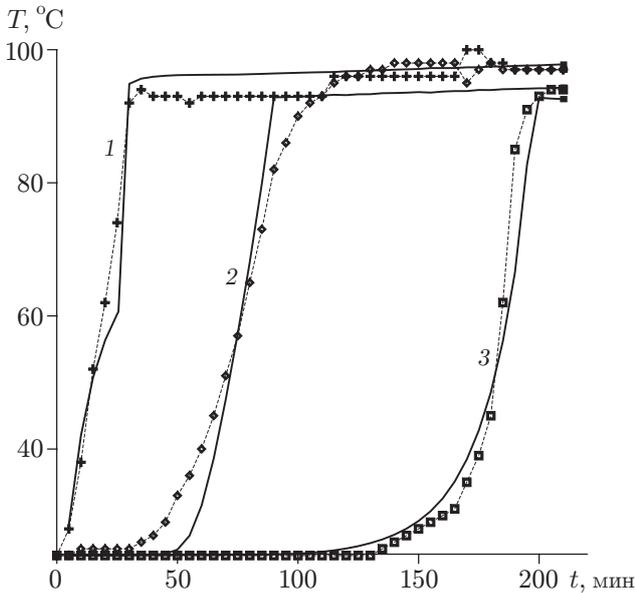


Рис. 2

Рис. 2. Динамика изменения температуры жидкости:

точки — эксперимент; сплошные линии — расчет; линия 1 соответствует положению первой термопары, 2 — второй, 3 — третьей

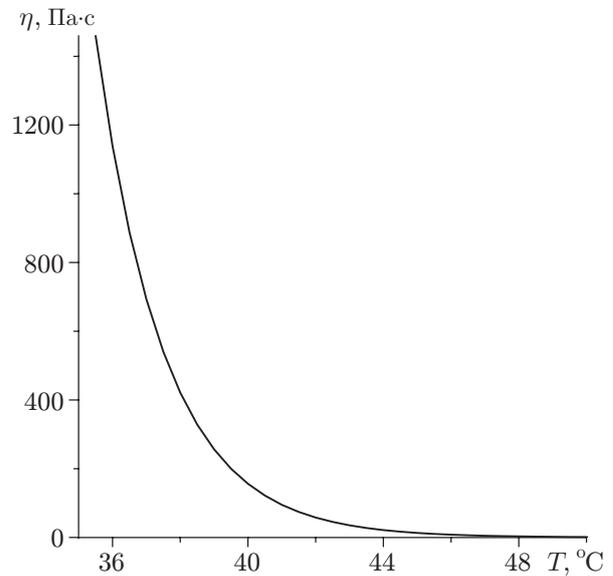


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость динамической вязкости исследуемой углеводородной жидкости от температуры

Для проведения расчетных исследований были измерены удельная теплоемкость и плотность углеводородной жидкости: $c_f = 1864$ Дж/(кг·К); $\rho_f = 954$ кг/м³. Теплопроводность при начальной температуре $\lambda_f = 0,125$ Дж/(кг·К). Определена зависимость вязкости углеводородной жидкости от температуры. Эксперименты показали, что при температуре $T < 35,5$ °С исследуемый объект не обладает свойством текучести и измерение реологических свойств вещества затруднительно. Поэтому исследования проводились в интервале температур $35,5 \div 75$ °С. Полученная зависимость вязкости от температуры была аппроксимирована в виде двух экспонент:

$$\eta(T) = \begin{cases} \eta_{01} \exp(-\gamma_1(T - 35,5)), & 35,5 \text{ °С} < T < 54,2 \text{ °С}, \\ \eta_{02} \exp(-\gamma_2(T - 54,2)), & 54,2 \text{ °С} < T < 75 \text{ °С}, \end{cases}$$

где $\eta_{01} = 1460$ Па·с — вязкость углеводородной жидкости при температуре 35,5 °С; $\eta_{02} = 0,228$ Па·с — вязкость углеводородной жидкости при температуре 54,2 °С; $\gamma_1 = 0,497$ К⁻¹ — температурный коэффициент в диапазоне $T = 35,5 \div 54,2$ °С; $\gamma_2 = 0,031$ К⁻¹ — температурный коэффициент в диапазоне $T > 54,2$ °С.

Математическая модель. Моделирование нагрева углеводородной жидкости проводилось с использованием параметров экспериментальной установки. Для этого использовалась цилиндрическая система координат r, φ, z с осью z , направленной вверх вдоль оси емкости, в аксиально-симметричной геометрии. С точки зрения математического моделирования физическая модель представляет собой многослойную среду. По координате r насчитывается четыре слоя: первый — $0 \leq r \leq R_1$ (для упрощения расчетов полагается, что индуктор, заполненный трансформаторным железом, представляет собой сплошной стальной цилиндр радиусом R_1 и длиной l); второй — воздушное пространство между индуктором и трубой индуктора ($R_1 \leq r \leq R_2$); третий — металлическая стенка тру-

бы индуктора ($R_2 \leq r \leq R_3$); четвертый — углеводородная жидкость ($R_3 \leq r \leq R_4$). Здесь R_2, R_3 — внутренний и внешний радиусы трубы индуктора; R_4 — радиус емкости с нефтешламом.

По координате z лабораторная модель также насчитывает четыре слоя: первый — бетон в основании емкости ($0 \leq z \leq Z_3$), второй — индуктор ($Z_3 \leq z \leq Z_3 + l$), третий — воздушное пространство над индуктором до поверхности углеводородной жидкости в емкости ($Z_3 + l \leq z \leq Z_3 + Z_1$), четвертый — выступающая над углеводородной жидкостью часть трубы индуктора ($Z_3 + Z_1 \leq z \leq Z_3 + Z_1 + Z_4$). Здесь Z_3 — толщина слоя бетона, l — высота индуктора, Z_1 — уровень заполнения емкости нефтешламом, Z_4 — высота трубы индуктора над поверхностью нефтяного шлама.

Постановка задачи. Индуктор устроен так, что энергия вихревых токов, создаваемых катушкой индуктивности, выделяется в виде тепла в стенке трубы индуктора. Это происходит в тонком скин-слое трубы, но из-за малой толщины стенки трубы и большой теплопроводности металла тепло, создаваемое индуктором, мгновенно распространяется и может рассматриваться как внутренние распределенные источники тепла в стенке трубы индуктора. Уравнение теплопроводности в стенке трубы индуктора имеет вид

$$c_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_m}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_m \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q, \quad q = \frac{N_0}{\pi(R_3^2 - R_2^2)l}, \quad (1)$$

где c_m, ρ_m, λ_m — соответственно удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность металла; q — плотность распределенных источников тепла; N_0 — мощность индуктора.

На других рассматриваемых участках (воздух между индуктором и трубой индуктора, углеводородная жидкость) теплопроводность среды — переменная величина. В первом случае это обусловлено возможной конвекцией воздуха, во втором, кроме того, еще и зависимостью молекулярной теплопроводности от температуры. Здесь уравнения теплопроводности имеют вид

$$c_a \rho_a \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_a \lambda_a r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_a \lambda_a \frac{\partial T}{\partial z} \right); \quad (2)$$

$$c_f \rho_f \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_f \lambda_f(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_f \lambda_f(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (3)$$

где c_a, ρ_a, λ_a — соответственно удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность воздуха; c_f, ρ_f, λ_f — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность углеводородной жидкости; $\varepsilon_a, \varepsilon_f$ — коэффициенты конвекции воздуха и углеводородной жидкости.

При проведении расчетов принята линейная зависимость теплопроводности жидкости от температуры (как известно, такая зависимость приемлема для многих материалов [1])

$$\lambda_f(T) = \lambda_{f0}[1 + b(T - T_0)].$$

Здесь λ_{f0} — коэффициент теплопроводности при температуре $T = T_0$; b — температурный коэффициент теплопроводности.

В слое бетона уравнение теплопроводности имеет вид

$$c_b \rho_b \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_b \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (4)$$

Здесь c_b, ρ_b, λ_b — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность бетона соответственно.

Краевые условия. Принято, что на внешней боковой и верхней поверхностях трубы индуктора, выступающей из углеводородной жидкости, теплообмен с окружающей средой

происходит по закону свободной конвекции в неограниченном пространстве [1, 5]. Соответственно, граничные условия имеют вид

$$\alpha_v(T(R_3, z, t) - T_0) = -\lambda_m \frac{\partial T(R_3, z, t)}{\partial r}; \quad (5)$$

$$\alpha_h(T(r, Z_3 + Z_1 + Z_4, t) - T_0) = -\lambda_m \frac{\partial T(r, Z_3 + Z_1 + Z_4, t)}{\partial z}. \quad (6)$$

Здесь α_v — коэффициент теплоотдачи вдоль вертикальной стенки; α_h — коэффициент теплоотдачи вдоль горизонтальной стенки; T_0 — первоначальная температура среды и температура воздуха, окружающего экспериментальную установку.

Модель нефтяного резервуара расположена на деревянном основании, сбоку изолирована пенопластом, поэтому принято, что в основании и в боковой части лабораторной модели тепловой поток равен нулю:

$$T(r, z, 0) = T_0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T(0, z, t)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T(R_4, z, t)}{\partial r} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

На поверхности нефтешлама теплообмен с окружающим воздухом также происходит по закону свободной конвекции:

$$\alpha_h(T(r, Z_3 + Z_1, t) - T_0) = -\lambda_f \frac{\partial T(r, Z_3 + Z_1, t)}{\partial z}. \quad (10)$$

На остальных границах слоев принимается равенство температур и тепловых потоков — граничное условие четвертого рода [1, 5].

Число Нуссельта (Nu) зависит от чисел Грасгофа (Gr) и Прандтля (Pr) [1]:

$$\text{Nu} = \alpha L / \lambda_a = f(\text{Gr}_a, \text{Pr}_a); \quad \text{Gr}_a = \beta_a g L^3 \Delta T_a / \nu_a^2; \quad \text{Pr}_a = \nu_a / a_a,$$

где α — коэффициент теплоотдачи; L — характерный размер; $\beta_a = 1/T$ — коэффициент объемного расширения воздуха; T — абсолютная температура; g — ускорение свободного падения; ΔT_a — разность температур между нагретой стенкой и окружающим воздухом; ν_a , a_a — кинематическая вязкость и температуропроводность воздуха.

Для определения коэффициента теплоотдачи вдоль вертикальной стенки использовалось уравнение

$$\text{Nu} = 0,75(\text{Gr}_a \text{Pr}_a)^{0,25} (\text{Pr}_a / \text{Pr}_w)^{0,25},$$

где индекс w относится к стенке. Для воздуха и двухатомных газов число Прандтля практически не зависит от температуры, поэтому $\text{Pr}_a / \text{Pr}_w = 1$. Характерным размером является высота выступающей над углеводородной жидкостью трубы: $L = Z_4$.

Характерным размером в граничном условии (6) является диаметр трубы, в граничном условии (10) — диаметр емкости.

Значение эффективной теплопроводности углеводородной жидкости λ_{cf} определяется по формуле [5]

$$\lambda_{cf} = \varepsilon_f \lambda_f.$$

В свою очередь, коэффициент конвекции углеводородной жидкости ε_f определяется из выражений:

$$\varepsilon_f = \begin{cases} 0,105(\text{Gr}_f \text{Pr}_f)^{0,3}, & 10^3 < \text{Gr}_f \text{Pr}_f < 10^6, \\ 0,40(\text{Gr}_f \text{Pr}_f)^{0,2}, & 10^6 < \text{Gr}_f \text{Pr}_f < 10^{10}. \end{cases} \quad (11)$$

Числа Грасгофа и Прандтля равны

$$\text{Gr}_f = \beta_f g L^3 \Delta T_f / \nu_f^2, \quad \text{Pr}_f = \nu_f / a_f,$$

где β_f — коэффициент объемного расширения углеводородной жидкости; ΔT_f — разность температур между нагретой стенкой трубы индуктора и точкой с координатой r , где достигнута температура $T_f = 93^\circ\text{C}$; ν_f , a_f — кинематическая вязкость и температуропроводность углеводородной жидкости.

Свободная конвекция в воздухе также приводит к увеличению теплопроводности. Эффективная теплопроводность воздуха λ_{ca} определяется по формуле

$$\lambda_{ca} = \varepsilon_a \lambda_a.$$

Коэффициент конвекции воздуха ε_a находится из выражений, аналогичных (11):

$$\varepsilon_a = \begin{cases} 0,105(\text{Gr}_a \text{Pr}_a)^{0,3}, & 10^3 < \text{Gr}_a \text{Pr}_a < 10^6, \\ 0,40(\text{Gr}_a \text{Pr}_a)^{0,2}, & 10^6 < \text{Gr}_a \text{Pr}_a < 10^{10}. \end{cases}$$

Числа Грасгофа и Прандтля равны

$$\text{Gr}_a = \beta_a g L^3 \Delta T / \nu_a^2, \quad \text{Pr}_a = \nu_a / a_a,$$

где ΔT — разность температур между индуктором и трубой индуктора. Характерным размером L в данном случае является ширина зазора между индуктором и трубой индуктора, т. е. $R_2 - R_1$.

Результаты вычислений. Система уравнений (1)–(4) с краевыми условиями (5)–(10) решалась методом конечных разностей переменных направлений по неявной схеме. Параметры среды имели следующие значения [1, 6]: $\lambda_m = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $c_m = 461 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\rho_m = 7900 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\lambda_a = 0,02896 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $c_a \rho_a = 1065 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; $\nu_a = 1,897 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda_b = 0,279 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $c_b \rho_b = 2,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; $\beta_f = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$.

Расчеты проводились с варьированием неизвестных коэффициентов до достижения максимального совпадения результатов расчетов с лабораторным экспериментом. В результате для исследуемой углеводородной жидкости (нефтьшлама) получено: $b = 0,513 \text{ К}^{-1}$; максимальное значение $\varepsilon_{cf} = 16$. Коэффициент b , характеризующий количественный рост молекулярной теплопроводности от температуры, показывает, что при увеличении температуры от 24 до 100°C теплопроводность возрастает в 40 раз. Сопоставление экспериментальных и расчетных кривых динамики изменения температуры приведено на рис. 2. Выполаживание кривых после достижения температуры $T \approx 93^\circ\text{C}$ можно объяснить процессом выкипания воды, содержащейся в нефтьшламе, и более легких фракций нефти. Это подтверждают и визуальные наблюдения.

На рис. 4 представлено трехмерное изображение температурного поля в емкости в момент времени 50 мин. Дно емкости расположено вдоль координаты r . Центр основания емкости находится в точке с координатой $r = 0$. Результаты, представленные на рисунке, объясняются следующим образом. В центре емкости располагается индуктор, который, сам не нагреваясь, передает энергию рабочей трубке. Некоторое повышение температуры на катушке индуктора происходит за счет обратной передачи тепла через воздух от рабочей трубы. Самая нагретая часть модели — труба на уровне расположения центра индуктора. Сильная зависимость теплопроводности углеводородной жидкости от температуры и наличие свободной конвекции приводят к тому, что в среде образуются две резко различающиеся по температуре области — область с высокой температурой, где из-за большой теплопроводности вещества температура везде практически одинакова, и область с низкой (практически первоначальной) температурой. Между ними — узкая переходная область с промежуточными значениями температуры.

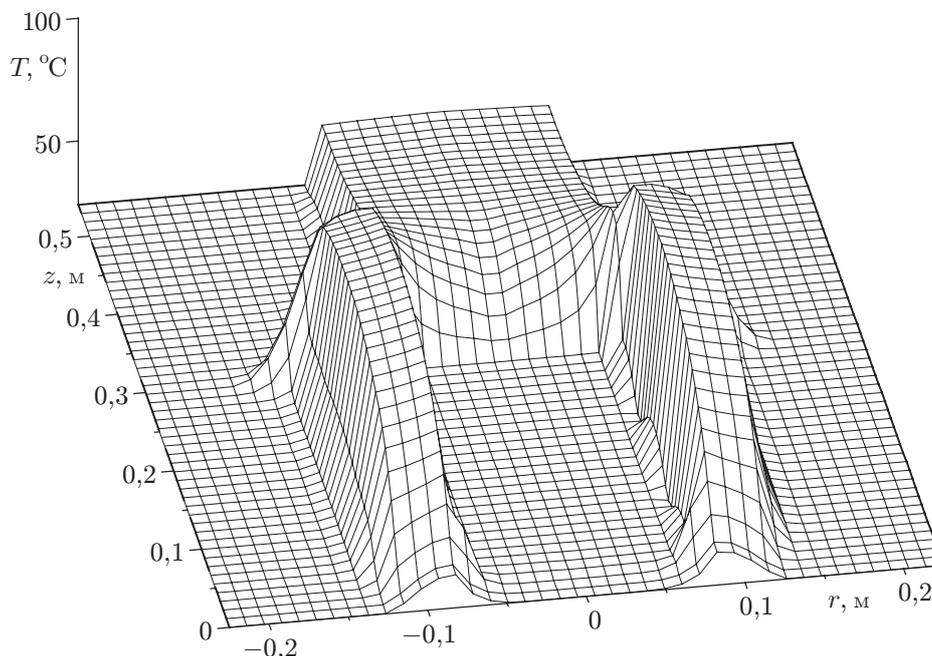


Рис. 4. Температурное поле в модели резервуара с углеводородной жидкостью в момент времени $t = 50$ мин

Аномальное поведение теплопроводности можно объяснить неоднородностью рассматриваемой гетерогенной углеводородной системы. Вследствие выделения газов, всплытия их на поверхность и увеличения размеров пузырьков по мере их всплытия и с повышением температуры углеводородная система напоминает собой пористую среду. Эффективная теплопроводность пористых тел, как известно, является условной величиной [1]. В углеводородной системе роль “скелета” играет жидкая фаза, а порами являются выделяющиеся пузырьки газа. В результате в углеводородной жидкости реализуется сложный теплообмен — совокупность всех трех видов переноса тепла: теплопроводность, конвекция и излучение внутри газовых пузырьков. После включения всех механизмов при температуре $T \approx 100$ °С эффективный коэффициент теплопроводности углеводородной жидкости становится сравнимым с теплопроводностью железа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нащекин В. В.** Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высш. шк., 1975.
2. **Остроумов Г. А.** Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1952.
3. **Филиппов Л. П.** Явления переноса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986.
4. **Остроумов Г. А., Тетюев В. А.** К вопросу о теории свободной тепловой конвекции в цилиндрических полостях // Журн. техн. физики. 1958. Т. 28, № 6. С. 1261–1262.
5. **Лыков А. В.** Теплообмен: Справочник. М.: Энергия, 1978.
6. **Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина.** М.: Атомиздат, 1976.

Поступила в редакцию 31/1 2005 г.