

УДК 536.24

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ВДОЛЬ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Курманова Динара Есентаевна

dikonya89_29@mail.ru

Докторант 2-го курса Евразийского национального университета имени Л.Н.Гумилева,
механико-математического факультета, кафедра математическое и компьютерное
моделирования, Нур-Султан, Казахстан
Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.Ж.Джайчибеков

Теплообменные аппараты (ТОА) широко используются в промышленности для передачи тепла от одной рабочей жидкости к другой в очень ограниченном и компактном пространстве. В работе [1] приводится подробный обзор работ по функционированию различных теплообменников.

В данной работе рассматривается определение эффективной длины теплообменного аппарата в зависимости от изменения вязкости нефти от температуры, а также определение температуры на выходе горячего теплоносителя. В случае же когда вязкость сильно зависит от температуры и по мере нагрева теплоносителя режим течения может измениться от ламинарного до развитого турбулентного.

В этом случае можно вычислять местный коэффициент теплоотдачи $\alpha(x)$ и использовать соотношения для локального числа Нуссельта вычисленные по локальным числам подобия

$$Nu_x = \frac{\alpha(x)d_g}{\lambda} = Nu \left(Re_x, Pr_x, Gr_x, Pr_w, \frac{x}{d_g} \right),$$

(1)

где x – текущая координата по длине ТОА, d_g – эффективный гидравлический диаметр, λ – теплопроводность жидкости.

В дальнейшем нами используется для горячего теплоносителя (вода) индекс-1, для холодного (нефть) индекс-2.

Имея выражение для местного коэффициента теплоотдачи можно вычислить его осредненное значение:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L} \int_0^L \alpha(x) dx$$

где L – длина ТОА.

Например, выражение для вычисления местного числа Нуссельта для турбулентного режима течения по трубам имеет вид [2]:

$$Nu_x = 0.22 Re_x^{0.8} Pr_x^{0.43} \left(\frac{Pr_x}{Pr_{x,w}} \right)^{0.25} \varepsilon_l,$$

где

$$\varepsilon_l = \begin{cases} 1, & \frac{x}{d} \geq 15 \\ \frac{1.38}{(x/d)^{0.12}} \end{cases}$$

В случае сильной зависимости вязкости от температуры предлагается разбить ТОА на элементарные участки по длине и внутри этих участков сделать предположение о малом изменении вязкости.

Тогда уравнение теплового баланса для элементарного участка ТОА при движении вдоль горячего теплоносителя можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_1}{dx} &= G_1 c_{p1}(t_1) \frac{dt_1}{dx}, \frac{dQ_1}{dx} \leq 0, \\ \frac{dQ_2}{dx} &= \pm G_2 c_{p2}(t_2) \frac{dt_2}{dx}, \frac{dQ_2}{dx} \geq 0, \\ \frac{dQ_1}{dx} + \frac{dQ_2}{dx} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где dQ_1 – потери количества теплоты горячим теплоносителем, dQ_2 – приобретенное количества теплоты холодным теплоносителем, G – массовый расход теплоносителя, c_p – теплоемкость, t – температура, dt – изменение температуры, знак «+» соответствует схеме «прямоток», а знак «-» схеме «противоток».

Уравнение теплопередачи для элементарного участка примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_1}{dx} &= k(t_1, t_2)(t_2 - t_1) \frac{dF}{dx}, \frac{dQ_1}{dx} \leq 0, \\ \frac{dQ_2}{dx} &= k(t_1, t_2)(t_1 - t_2) \frac{dF}{dx}, \frac{dQ_2}{dx} \geq 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где k – местный коэффициент теплопередачи, $\frac{dF}{dx}$ – изменение площади поверхности теплообмена, которая для ТОА из прямых труб остается постоянной величиной.

Из уравнений (2) и (3) можно получить замкнутую систему уравнений относительно температур теплоносителей:

$$\begin{aligned} \frac{dt_1}{dx} &= \frac{k(t_1, t_2)}{G_1 c_{p1}(t_1)} (t_2 - t_1) \frac{dF}{dx}, \\ \frac{dt_2}{dx} &= \pm \frac{k(t_1, t_2)}{G_2 c_{p2}(t_2)} (t_1 - t_2) \frac{dF}{dx}. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как величина $\frac{dF}{dx} = const$ известная, то эта система является системой обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейной правой частью.

Для случая схем прямоток для системы (4) ставится задача Коши, а для схем противоток ставится краевая задача, при этом интегрирование ведется до длины ТОА L , которая заранее неизвестна.

Для реализации общего подхода к решению и априорных данных о гладкости решения (аналитическое решение гладкое в случае постоянной вязкости и теплопроводности) предлагается систему уравнений (4) решать численным методом конечных разностей в постановке краевой задачи на интервале $x \in [0, L]$

Для стабилизации итерационного процесса при линеаризации системы предлагается применять метод нижней релаксации.

Заметим, что длина области интегрирования L заранее не известна и для ее определения можно использовать метод Ньютона, чтобы обеспечить передачу нужного количества тепла в ТОА.

В этом случае, местный коэффициент теплопередачи для тонких стенок будет вычисляться через местные коэффициенты теплоотдачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где α_1 – местный коэффициент теплоотдачи от холодного теплоносителя к стенке, α_2 – местный коэффициент теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя, δ_w – толщина стенок трубок, λ_w – коэффициент теплопроводности материала трубок.

Для определения температуры на выходе горячего теплоносителя и соответствующую ей эффективную длину ТОА используем уравнения теплового баланса теплоносителей.

Для расчета эффективной длины теплообменника и температуры на выходе горячего теплоносителя задаются следующие входные данные, приведенные в таблице 1.

Таблица 1: Входные данные расчета ТОА.

| Параметры ТОА | Единица измерения | Обозначение | Количество |
|---|-------------------|--------------|---|
| Тип расчета | | | Определение длины и температуры горячего теплоносителя на выходе прямоток |
| Тип ТОА | | | прямоток |
| Холодный теплоноситель | | | в трубки |
| Толщина стенок трубок | Мм | δ_w | 1 |
| Внутренний диаметр трубок | Мм | d | 12 |
| Внешний диаметр трубок | Мм | d_c | 14 |
| Внутренний диаметр кожуха | мм | D | 20 |
| Температура на входе горячего теплоносителя | К | T_{hotin} | 423 |
| Расход горячего теплоносителя | кг/с | G_{hot} | 0,6386 |
| Скорость горячего теплоносителя | м/с | v_{hot} | 4 |
| Температура на входе холодного | К | T_{coldin} | 303 |

| | | | |
|-----------------------|-----------|------------------|--------|
| теплоносителя | | | 328 |
| Температура на выходе | К | $T_{cold_{out}}$ | |
| холодного | | | 0,3814 |
| теплоносителя | кг/с | G_{cold} | |
| Расход | холодного | | 4 |
| теплоносителя | м/с | v_{cold} | |
| Скорость | холодного | | |
| теплоносителя | | | |

Результаты расчетов

| Модель теплоносителя | С постоянными параметрами | С переменными параметрами |
|---|---------------------------|---------------------------|
| Длина ТОА, м | 5,2788 | 4,2643 |
| Температура на выходе горячего теплоносителя, К | 415,9922 | 415,9921 |

Для верификации полученных результатов проведены также расчеты в программной среде Ansys fluent. Результаты расчетов приведены в виде графиков на следующих рисунках.

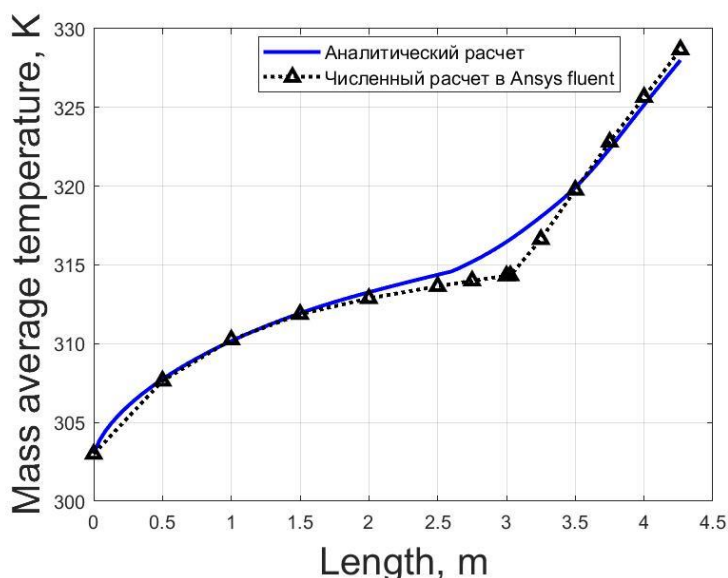


Рисунок 1. Распределение среднемассовой температуры нефти вдоль ТОА. Сплошная линия – результаты, полученные по программе MatLab; пунктирная линия с треугольными значками – численный расчет на Ansys fluent.

На рисунке 1 показаны распределения среднемассовой температуры нефти (холодного теплоносителя) вдоль ТОА, полученные двумя способами: по методике реализованной на MatLab используя метод конечных разностей и на основе программного комплекса Ansys fluent. Как и ожидалось, среднемассовая температура нефти возрастает вдоль «нефтепровода» за счет нагревания от источника тепла – горячего теплоносителя. Из графиков видно, что результаты аналитических расчетов (MatLab) и численного расчета (Ansys fluent) хорошо согласуются.

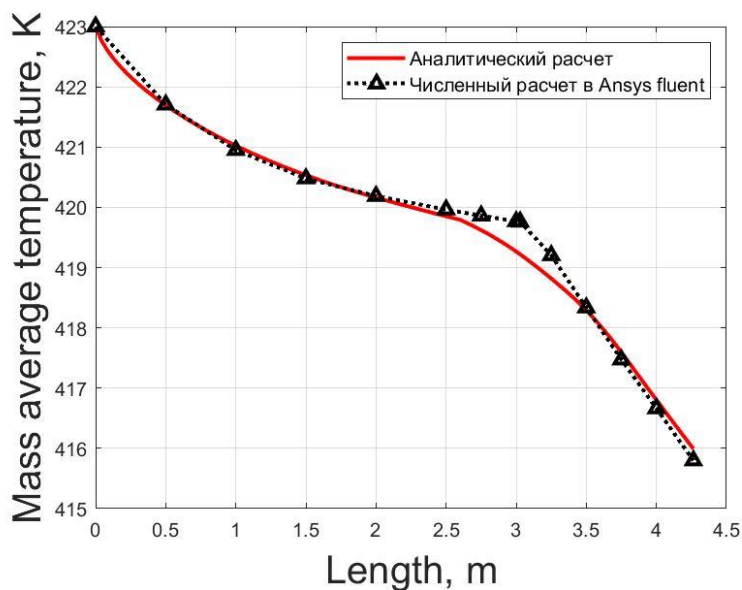


Рисунок 2. Распределение среднемассовой температуры воды вдоль ТОА. Сплошная линия – результаты, полученные по программе MatLab; пунктирная линия с треугольными значками – численный расчет на Ansys fluent.

Аналогично, на рисунке 2 показаны распределения среднемассовой температуры воды (горячего теплоносителя) вдоль ТОА, полученные также двумя способами: по методике реализованной на MatLab используя метод конечных разностей и на основе программного комплекса Ansys fluent. Здесь наблюдается обратная картина по сравнению с рисунком 1, а именно, среднемассовая температура воды убывает вдоль «трубопровода» за счет передачи тепла от нее к холодному теплоносителю. Здесь также можно отметить хорошую согласованность результатов при двух способах расчета: аналитического и численного расчета. Из графиков, показанных на рисунках 1 и 2, можно заметить характерные изменения кривизны линий в районе приблизительно в 2,5 метра от начала теплообменного аппарата, где в обоих случаях происходят резкие изменения градиентов температур с соответствующими знаками. Этот переход происходит на том расстоянии ТОА, где ламинарный режим течения переходит в турбулентный.

Список использованных источников

1. Darbandi, Masoud and Abdollahpour, Mohammad-Saleh and Hasanpour-Matkolaei, Mohamadreza. A new developed semi-full-scale approach to facilitate the CFD simulation of shell and tube heat exchangers // Chemical Engineering Science. 2021. Vol.245. P. 116836
2. В.П.Исаченко, В.А.Осипова, А.С.Сукомел. Теплопередача. Учебник. Издательство «Энергия»,1965