

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-820-827

УДК 536.24

Математическое моделирование теплообменного аппарата с учетом сильной зависимости вязкости нефти от температуры

Динара Есентаевна Курманова¹, Нурболат Жумабекович Джайчибеков²✉

^{1,2} Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, 010008, Республика Казахстан

¹ dikonya89_29@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-9787-7426>

² jaich@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3053-8288>

Аннотация

Введение. Подогрев нефти и нефтепродуктов широко применяется для уменьшения энергопотерь при транспортировке. Течение в межтрубном пространстве теплообменника имеет сложный характер и зависит от многих факторов. Использование тонких трубок в теплообменных аппаратах геликоидного типа приводит к необходимости учета перехода режима течения от ламинарного к турбулентному. Традиционно используемые в численных расчетах полуэмпирические модели турбулентности не учитывают ламинарно-турбулентный переход. Разработан подход к определению эффективной длины теплообменного аппарата и температуры холодного теплоносителя на его выходе в случае сильной зависимости вязкости нефти от температуры с учетом возможности ламинарно-турбулентного перехода. В качестве нагреваемого теплоносителя рассмотрена нефть, а нагревающего компонента — вода. **Метод.** Новизна разработанного подхода заключается в применении модели турбулентности, учитывающей ламинарно-турбулентный переход, к расчету теплообменных аппаратов геликоидного типа. Для численного моделирования применены осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, замкнутые при помощи модели турбулентности $\gamma-Re_{\theta}$, учитывающей ламинарно-турбулентный переход. **Основные результаты.** Выполнено сравнение результатов численных расчетов с данными, полученными на основе метода среднелогарифмической разницы температур при постоянной и переменной вязкостях. В случае переменной вязкости нефти обнаружен переход ламинарного режима течения в турбулентный, который оказывает существенное влияние на эффективную длину теплообменного аппарата. **Обсуждение.** Результаты численных расчетов могут быть полезны при проектировании теплообменных аппаратов геликоидного типа.

Ключевые слова

энергетика, теплообмен, вязкость, гидродинамика, нефтепродукты, численное моделирование, ламинарно-турбулентный переход

Ссылка для цитирования: Курманова Д.Е., Джайчибеков Н.Ж. Математическое моделирование теплообменного аппарата с учетом сильной зависимости вязкости нефти от температуры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 4. С. 820–827. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-820-827

Modeling and simulation of heat exchanger with strong dependence of oil viscosity on temperature

Dinara E. Kurmanova¹, Nurbolat Zh. Jaichibekov²✉

^{1,2} L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Kazakhstan

¹ dikonya89_29@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-9787-7426>

² jaich@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3053-8288>

Abstract

Heating of oil and oil products is widely used to reduce energy losses during transportation. The flow in the annular space of the heat exchanger is complex and depends on many factors. The use of thin tubes in helicoid-type heat exchangers makes it necessary to take into account the transition of the flow regime from laminar to turbulent. The semi-empirical turbulence models traditionally used in numerical calculations do not take into account the laminar-turbulent transition.

© Курманова Д.Е., Джайчибеков Н.Ж., 2023

An approach is developed to determine the effective length of the heat exchanger and the temperature of the cold coolant at its outlet in the case of a strong dependence of oil viscosity on temperature, taking into account the possibility of a laminar-turbulent transition. Oil is considered as a heated coolant, and water is considered as a heating component. The novelty of the developed approach lies in the application of the turbulence model, which takes into account the laminar-turbulent transition, to the calculation of helicoid-type heat exchangers. For numerical simulation, the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations are used which are closed using γ - $Re_{\theta t}$ turbulence model that takes into account the laminar-turbulent transition. The results of numerical calculations are compared with the data obtained on the basis of the log-mean temperature difference method at constant and variable viscosity. In the case of variable oil viscosity, a transition from the laminar flow regime to the turbulent one is manifested which has a significant effect on the effective length of the heat exchanger. The results of numerical calculations can be useful in designing helicoid-type heat exchangers.

Keywords

energy, heat transfer, viscosity, hydrodynamics, oil products, simulation, laminar and turbulent transition

For citation: Kurmanova D.E., Jaichibekov N.Zh. Modeling and simulation of heat exchanger with strong dependence of oil viscosity on temperature. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 820–827 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-820-827

Введение

Изменение качественного состояния сырьевой базы приводит к освоению и вовлечению в эксплуатацию месторождений нефти с высоким содержанием парафинов, смол, асфальтенов. Разработка таких месторождений требует применения нетрадиционных методов добычи нефти и ее подготовки к транспортировке. Светлые нефтепродукты (бензин, керосин) легко транспортируются по трубопроводам в любое время года и операции с ними не вызывают особых затруднений. Операции с темными нефтепродуктами (мазут, смазочные масла) и сырой нефтью вызывают значительные трудности, связанные тем, что темные нефтепродукты при понижении температуры воздуха становятся более вязкими, и их транспортировка без подогрева невозможна. Для трубопроводной транспортировки нефти и нефтепродуктов используется подход, основанный на регулировании реологических свойств нефти, например, при помощи нагрева нефти с ее последующей транспортировкой по трубопроводу с повышенной теплоизоляцией (горячая перекачка нефти). В некоторых случаях увеличение вязкости нефти при понижении температуры приводит к недопустимым напряжениям на стенках трубы и остановке транспортировки.

Процессы теплообмена осуществляются в теплообменных аппаратах (heat exchanger) различных типов и конструкций [1–5]. Для подогрева применяются различные теплоносители, например, горячая вода или водяной пар. Потребление энергии является одним из важных факторов, который оказывает существенное влияние на конструкцию теплообменника [6]. В нефтегазовой отрасли применение находят кожухотрубные теплообменники, которые обеспечивают хорошие характеристики производительности в широком диапазоне рабочих условий, высокую надежность и низкую стоимость.

Состав нефти (в частности, содержание асфальтенов, смол, парафинов) оказывает существенное влияние на зависимость вязкости от температуры [7, 8]. Эмпирические формулы, описывающие изменение кинематической вязкости в зависимости от температуры, имеют вид различных функций (экспоненциальные, полиномиальные, степенные и т. д.), которые характеризуются наличием коэффициентов, зависящих от

свойств жидкости. Постоянные коэффициенты определяются на основе значений измеренных кинематических вязкостей в экспериментальных точках. Для расчетов термодинамических параметров нефти, газовых конденсатов и их фракций используется обобщенное уравнение состояния Ли–Кесслера [9]. В работе [10] проведены исследования зависимости кинематической вязкости нефти и смесей нефтей от температуры, а также проанализированы существующие формулы для расчета кинематической вязкости нефти в магистральных трубопроводах.

Течение жидкости в межтрубном пространстве теплообменника имеет сложный характер и зависит от многих факторов. Численное моделирование теплообмена в теплообменных устройствах различных конструкций проведено в работах [11, 12]. Результаты численных расчетов применяются для поиска оптимальных способов интенсификации процессов теплообмена [13–15]. Полученные результаты указывают на уменьшение влияния вязкости перекачиваемой нефти на гидравлическую характеристику трубопровода при перекачке на развитых турбулентных режимах.

Сравнение точности различных моделей турбулентности, используемых для замыкания уравнений Рейнольдса, выполнено в [16–19]. В основном в расчетах используются k - ϵ и k - ω модели турбулентности, а также Shear Stress Transport (SST) модель k - ω . Полученные результаты сравнения моделей позволяют добиться удовлетворительного совпадения результатов расчетов с данными промышленных экспериментов. В результате возможно решить задачи управления процессами, повысить эффективность производства и определить оптимальные режимные параметры технологических процессов. Вместе с тем имеющиеся расчеты с использованием двухпараметрических моделей турбулентности не учитывают ламинарно-турбулентный переход, что сказывается на определении эффективной длины теплообменного аппарата [20].

В классических теплообменных аппаратах пучок труб для одного теплоносителя помещается внутри кожуха, по которому движется другой теплоноситель. В конструкции геликоидных теплообменников применяются профилированные трубки и ребра винтового профиля, с помощью которых улучшаются условия теплообмена. Трубки в таких аппаратах имеют малый

диаметр и тонкие стенки (около 0,3 мм). В случае, когда вязкость зависит от температуры, режим течения в таких тонких трубках может изменяться от ламинарного до турбулентного. Обычно точка перехода ламинарного режима течения в турбулентный определяется по косвенным признакам, например, по резкому изменению коэффициента трения.

В настоящей работе разработана математическая модель теплообменного аппарата, учитывающая ламинарно-турбулентный переход. Выбрана схема теплообменника «труба в трубе» с тонкой и гладкой внутренней трубкой. Приведен метод расчета теплообменника прямоточного типа, в котором во внутреннем трубопроводе рабочей жидкостью является нефть (холодный теплоноситель), а во внешней трубе — вода (горячий теплоноситель). Расчеты проведены для модельной конструкции теплообменного аппарата на базе двух подходов, основанных на методе среднелогарифмической разницы температур (Log-Mean Temperature Difference, LMTD) при постоянной и переменной вязкости и на основе средств вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса замкнуты при помощи модели турбулентности, учитывающей ламинарно-турбулентный переход. Выполнено сравнение данных, полученных в рамках двух подходов.

Математическая модель

В расчетах использованы методы: среднелогарифмической разницы температур при постоянной и переменной вязкости; вычислительной гидродинамики.

Метод среднелогарифмической разницы температур. Для оценки тепловых потоков от горячего теплоносителя к холодному применяется модель теплоносителя с постоянной или переменной по длине вязкостью, основанная на использовании среднелогарифмической разницы температур. В случае сильной зависимости вязкости от температуры теплообменник разбивается на элементарные участки по длине. На каждом участке делается предположение о малом изменении вязкости.

Число Нуссельта зависит от режима течения (ламинарный, переходный, турбулентный) и режима теплообмена (нагрев или охлаждение). Локальные числа Нуссельта в ламинарном и турбулентном режимах течения рассчитываются при помощи соотношений, приведенных в работах [21–23]. Для кольцевого канала в турбулентном режиме течения используется соотношение, как и для течения в трубе, но со своим эквивалентным гидравлическим диаметром. Переход между различными критериальными соотношениями, соответствующими ламинарному, переходному и турбулентному режимам течения, реализуется в зависимости от числа Рейнольдса, которое находится по среднemasовой скорости (при $Re \sim 2 \cdot 10^3$ и $Re \sim 10^4$).

Метод вычислительной гидродинамики. Результаты расчетов при помощи метода среднелогарифмической разницы температур сравниваются с данными, полученными методами вычислительной гидродинамики. Течение считается стационарным и осесимметричным,

нефть — ньютоновской жидкостью с постоянной плотностью и переменными теплофизическими свойствами. Расчеты проводятся при помощи численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (Reynolds-Averaged Navier–Stokes, RANS) для вязкой несжимаемой жидкости, замкнутой благодаря модели турбулентности, учитывающей ламинарно-турбулентный переход [24].

Модель турбулентности SST $k-\omega$ разработана для эффективного сочетания надежной и точной модели $k-\omega$ в пристеночной области и модели $k-\epsilon$ в свободном потоке [25, 26]. Для переключения между моделями применяется специальная функция, которая принимает единичное значение в пристеночной области (стандартная модель $k-\omega$) и нулевое значение вдали от стенки (модель $k-\epsilon$).

Модель, учитывающая ламинарно-турбулентный переход (Local-Correlation Transition Model, $\gamma-Re_{\theta t}$ transition model), основана на сочетании уравнений SST $k-\omega$ модели турбулентности с двумя дополнительными уравнениями переноса для параметра перемежаемости γ и критического числа Рейнольдса $Re_{\theta t}$, построенного по толщине потери импульса [27, 28]. Для упрощения модели уравнение для $Re_{\theta t}$ не рассматривается, а в уравнении для параметра перемежаемости делается предположение о малости конвективных слагаемых [29]. Такой подход приводит к алгебраическим соотношениям для нахождения параметра перемежаемости.

Модель турбулентности $\gamma-Re_{\theta t}$, используемая в расчетах, была разработана для решения задач внешней аэродинамики. В дальнейшем модель успешно применялась для моделирования широкого круга течений. В частности, в работе [30] проведено сравнение различных моделей турбулентности ($k-\epsilon$, $k-\omega$, SST, v^2-f , $\gamma-Re_{\theta t}$) применительно к течениям в каналах и показаны преимущества модели $\gamma-Re_{\theta t}$ перед другими моделями турбулентности.

В научных работах применяются различные зависимости вязкости от температуры. В нефтяной отрасли при расчете кинематической вязкости ν , зависящей от температуры T , используется формула Вальтера [10]

$$\lg[\lg(\nu + 0,8)] = a + b \lg T, \quad (1)$$

где a и b — эмпирические коэффициенты, определяемые для исследуемой жидкости экспериментальным путем. Коэффициенты a и b в формуле (1) находятся из соотношений

$$a = \lg[\lg(\nu_1 + 0,8)] - b \lg T,$$

$$b = \frac{\lg[\lg(\nu_1 + 0,8)] - \lg[\lg(\nu_2 + 0,8)]}{\lg T_1 - \lg T_2},$$

где ν_1 и ν_2 — значения кинематической вязкости жидкости при температурах T_1 и T_2 .

Численное моделирование

Реализация метода среднелогарифмической разницы температур заключается в интегрировании системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Уравнения решены методом конечных разностей на интервале $x \in [0, L]$, где L — длина теплообменника, что позволяет применить разработанный подход для расчета прямоточных и противоточных теплообменников. Для стабилизации итерационного процесса при линеаризации системы применен метод нижней релаксации. Длина промежутка интегрирования L заранее неизвестна, которая определена методом Ньютона.

Выполнена дискретизация осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса и уравнений модели турбулентности с помощью методов конечных объемов на неструктурированных сетках и коррекции давления Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE) [31]. Дискретизация невязких потоков осуществлена с использованием монотонной противоточной схемы для законов сохранения (Monotonic Upstream Schemes for Conservation Laws, MUSCL), а вязких потоков — центрированная схема второго порядка точности. Схема MUSCL позволила повысить порядок аппроксимации по пространственным переменным без потери монотонности решения, соответствует условию Total Variation Diminishing (TVD) и представляет собой комбинацию центрированных конечных разностей второго порядка и диссипативного члена, для переключения между которыми служит ограничитель потока, построенный на основе характеристических переменных. Для решения системы разностных уравнений использован геометрический многосеточный метод [31].

Для расчетов ядра потока выбрана сетка, состоящая из 19 461 ячейки, из которых 500×24 ячеек размещены в области, заполненной нефтью, 500×5 ячеек — в области из стали, а 500×13 — в области, заполненной водой. Сгущение ячеек сетки произведено около стенок трубы таким образом, чтобы $y^+ < 2$, где y^+ — безразмерная пристеночная координата. Для этого в пристеночном слое размещено 15 узлов сетки, расстояние между которыми изменяется по закону геометрической прогрессии.

Результаты и обсуждение

В качестве примера рассмотрим нефть Узеньского нефтегазового месторождения, расположенного в Мангистауской области Казахстана. Залежи нефти находятся на глубине 0,9–2,4 км. Нефть имеет следующие параметры: плотность составляет 844–874 кг/м³; вязкость — 3,4–8,15 мПа·с; содержание серы — 0,16–2 %, парафинов 16–22 % и смол — 8–20 %.

Выполним сравнение результатов расчетов по формуле Вальтера с экспериментальными значениями динамической вязкости $\mu = \rho \nu$, где ρ — плотность (рис. 1) для нефти Узеньского месторождения. Температура изменяется от 283 до 383 К.

Для расчета эффективной длины теплообменника и температуры горячего теплоносителя на выходе заданы следующие параметры: $T_{ci} = 303$ К и $T_{co} = 328$ К (входная и выходная температуры холодного теплоносителя); $T_{hi} = 423$ К (входная температура горячего теплоносителя); $\nu_c = 4$ мс и $\nu_h = 4$ мс (скорости холодного и горячего теплоносителя); $G_c = 0,3814$ кг/с и $G_h = 0,6386$ кг/с

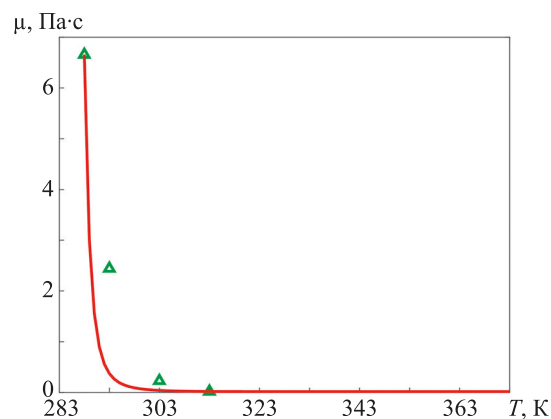


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости нефти Узеньского месторождения от температуры.

Экспериментальные данные [20] (треугольные значки) и расчеты по формуле Вальтера (1) (сплошная линия)

Fig. 1. The dependence of the dynamic viscosity of oil from the Uzen field vs. temperature. Triangular symbols correspond to experimental data [20], solid line corresponds to calculations by the Walther formula (1)

(расходы горячего и холодного теплоносителя); геометрические характеристики (толщина стенок трубок $\delta_w = 1$ мм, внутренний и внешний диаметры трубок $d_i = 12$ мм и $d_o = 14$ мм, внутренний диаметр кожуха $D = 20$ мм); физические свойства материала трубок.

В результате решения уравнения теплового баланса методом конечных разностей получено, что длина теплообменника составляет $L = 5,28$ м (для постоянной вязкости) и $L = 4,26$ м (для переменной вязкости). При этом температура горячего теплоносителя на выходе достигла 416 К.

Выполним сравнение полученных результатов с данными численного моделирования. На рис. 2, а показаны распределения среднетемпературы нефти (холодного теплоносителя) (T_m) вдоль длины теплообменника, полученные при помощи метода конечных разностей и на основе численного моделирования. Среднетемпература нефти возрастает вдоль длины за счет нагревания от источника тепла (горячего теплоносителя). Результаты аналитических и численных расчетов достаточно хорошо согласуются между собой.

Распределения среднетемпературы воды (горячего теплоносителя) вдоль длины, полученные на основе аналитических и численных расчетов, показаны на рис. 2, б. Среднетемпература воды убывает вдоль длины трубы за счет передачи тепла от нее к холодному теплоносителю. Следует отметить хорошее согласование результатов расчетов, полученных на основе различных подходов.

На рис. 2 видны характерные изменения кривизны линий на расстоянии порядка 2,5 м от входного сечения, где заметны резкие изменения градиентов температур. Изменения происходят на расстоянии, на котором ламинарный режим течения переходит в турбулентный. На рис. 3 приведены графики изменения числа Рейнольдса вдоль длины теплоносителей, полученные при аналитическом расчете с моделью переменной

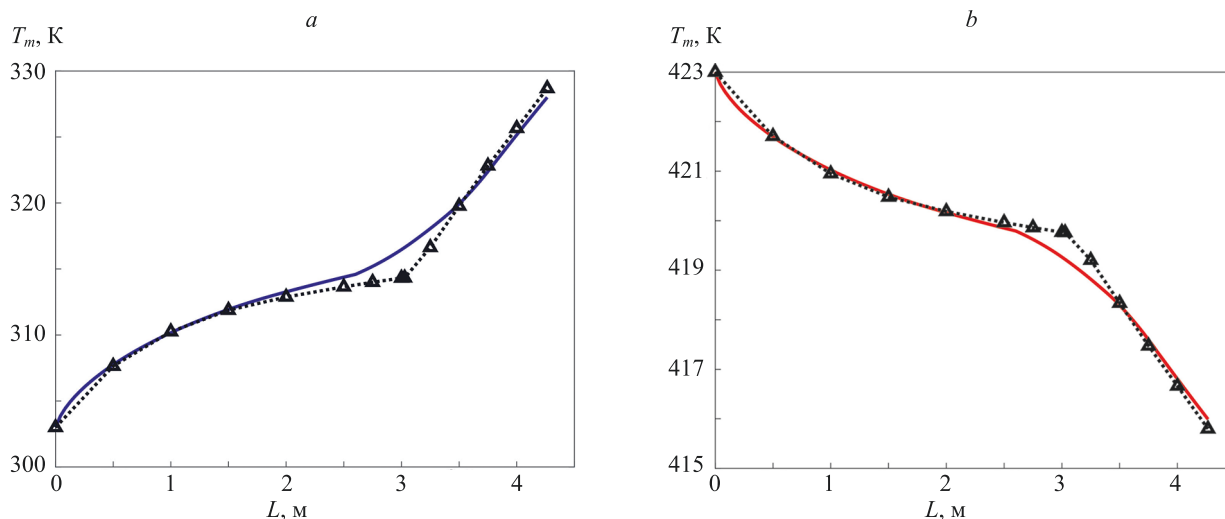


Рис. 2. Распределения среднemasовых температур нефти (a) и воды (b) вдоль длины теплообменника. Результаты, полученные на основе теоретического подхода (сплошная линия) и численных расчетов (пунктирная линия с треугольными значками)

Fig. 2. Distribution of average mass temperatures of oil (a) and water (b) along the length of the heat exchanger. The results obtained on the basis of a theoretical approach (solid line) and numerical calculations (dotted line with triangular icons)

вязкости. Для воды число Рейнольдса практически не меняется при постоянном значении вязкости и незначительном изменении температуры. Обратная картина наблюдается для холодного теплоносителя (нефти). Число Рейнольдса существенно возрастает, что связано с резким уменьшением вязкости нефти при ее практически неизменной плотности. Отметим, что наблюдается переходный участок на расстоянии порядка от 1,85 до 3,8 м, где происходит переход ламинарного течения в турбулентный.

На рис. 4 приведен график изменения числа Рейнольдса нефти (холодного теплоносителя) вдоль

длины теплообменного аппарата при переменных значениях вязкости нефти (линия 1). Видно, что значения числа Рейнольдса резко возрастают вдоль продольной координаты, что объясняется уменьшением вязкости нефти за счет ее нагревания. На рисунке приведен также график поведения числа Рейнольдса нефти при средней температуре теплоносителя (линия 2). При постоянной вязкости число Рейнольдса холодного теплоносителя постоянно и не может правильно охарактеризовать теплообмен в данном теплообменном аппарате.

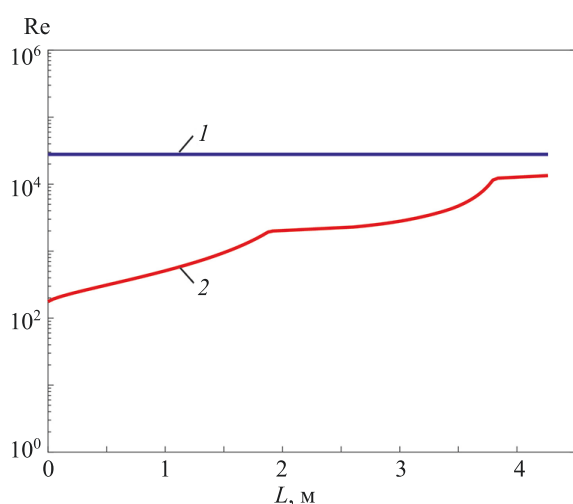


Рис. 3. Распределения чисел Рейнольдса по длине, полученные при аналитическом расчете для воды (линия 1) и нефти (линия 2)

Fig. 3. Length distributions of Reynolds numbers obtained in an analytical calculation. Line 1 corresponds to water and line 2 to oil

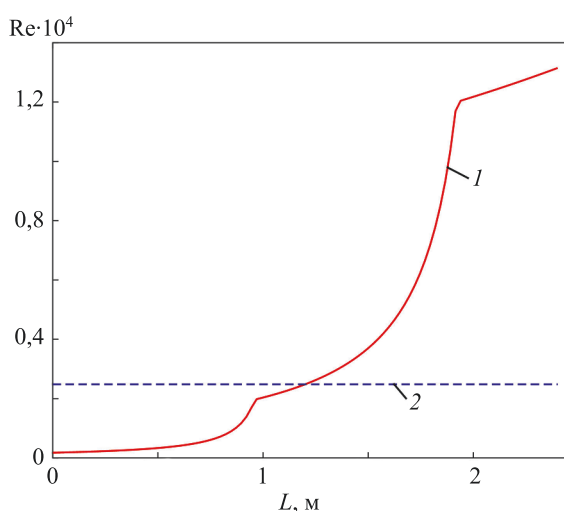


Рис. 4. Распределения чисел Рейнольдса нефти вдоль длины теплоносителя при численном расчете при переменной вязкости (линия 1) и теоретическом расчете (линия 2)

Fig. 4. Distributions of oil Reynolds numbers along length. Line 1 corresponds to the numerical calculation at variable viscosity, and line 2 corresponds to the theoretical calculation

Заключение

Снижение вязкости нефти при нагреве является одним из способов повышения энергоэффективности процесса перекачки высоковязкой нефти при добыче и транспортировке. Численное моделирование позволяет сократить сроки и трудоемкость испытаний новых конструкций теплообменных аппаратов в нефтегазовой отрасли.

Проведено численное моделирование кожухотрубчатого теплообменника средствами вычислительной гидродинамики. Получены распределения скорости и

температуры в теплообменном аппарате. Выполнено сравнение результатов численных расчетов с данными, полученными на основе метода среднелогарифмической разницы температур в случае постоянной и переменной вязкости. При переменной вязкости нефти осуществлен переход от ламинарного режима в турбулентный. Результаты эксперимента показали, что модель с постоянной вязкостью приводит к заниженной примерно на 20 % длине теплообменного аппарата по сравнению с расчетами, учитывающими зависимость вязкости нефти от температуры.

Литература

1. Nakaso K., Mitani H., Fukai J. Convection heat transfer in a shell-and-tube heat exchanger using sheet fins for effective utilization of energy // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. V. 82. P. 581–587. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.033>
2. Wang Y., Gu X., Jin Z., Wang K. Characteristics of heat transfer for tube banks in crossflow and its relation with that in shell-and-tube heat exchangers // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. V. 93. P. 584–594. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.018>
3. Araavind S., Athreya A.S. CFD analysis of shell and tube heat exchanger for pre-heating of biodiesel // *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2017. V. 6. N 7. P. 687–693.
4. Abda A.A., Kareema M.Q., Najib S.Z. Performance analysis of shell and tube heat exchanger: parametric study // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. V. 12. P. 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.07.009>
5. Лычаков В.Д., Егоров М.Ю., Щеглов А.А., Сивоволов А.С., Матяш А.С., Балунов Б.Ф. Анализ теплоотдачи сборок оребренных теплообменных элементов // *Теплоэнергетика*. 2022. № 3. С. 63–71.
6. Darbandi M., Abdollahpour M.-S., Hasanpour-Matkolaei M. A new developed semi-full-scale approach to facilitate the CFD simulation of shell and tube heat exchangers // *Chemical Engineering Science*. 2021. V. 245. P. 116836. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116836>
7. Bizhan K.G., Mohammad R.D., Hossein P. Prediction of kinematic viscosity of petroleum fractions using artificial neural networks // *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*. 2014. V. 3. N 2. P. 51–65.
8. Boda M.A., Bhasagi P.N., Sawade A.S., Andodgi R.A. Analysis of kinematic viscosity for liquids by varying temperature // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2015. V. 4. N 4. P. 1951–1954. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0404020>
9. Lee B.I., Kesler M.G. A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states // *AIChE Journal*. 1975. V. 21. N 3. P. 510–527. <https://doi.org/10.1002/aic.690210313>
10. Аралов О.В., Буянов И.В., Саванин А.С., Иорданский Е.И. Исследование методов расчета кинематической вязкости нефти в магистральном нефтепроводе // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2017. Т. 7. № 5. С. 97–105.
11. Yogesh S.S., Selvaraj A.S., Ravi D.K., Rajagopal T.K.R. Heat transfer and pressure drop characteristics of inclined elliptical fin tube heat exchanger of varying ellipticity ratio using CFD code // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 119. P. 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.094>
12. Chen K., Mohammed H.I., Mahdi J.M., Rahbari A., Cairns A., Talebizadehsardari P. Effects of non-uniform fin arrangement and size on the thermal response of a vertical latent heat triple-tube heat exchanger // *Journal of Energy Storage*. 2022. V. 45. P. 103723. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103723>
13. Osley W.G., Droegemueller P., Ellerby P. CFD investigation of heat transfer and flow patterns in tube side laminar flow and the potential for enhancement // *Chemical Engineering Transactions*. 2013. V. 35. P. 997–1002. <https://doi.org/10.3303/CET1335166>

References

1. Nakaso K., Mitani H., Fukai J. Convection heat transfer in a shell-and-tube heat exchanger using sheet fins for effective utilization of energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 82, pp. 581–587. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.033>
2. Wang Y., Gu X., Jin Z., Wang K. Characteristics of heat transfer for tube banks in crossflow and its relation with that in shell-and-tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 93, pp. 584–594. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.018>
3. Araavind S., Athreya A.S. CFD analysis of shell and tube heat exchanger for pre-heating of biodiesel. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 2017, vol. 6, no. 7, pp. 687–693.
4. Abda A.A., Kareema M.Q., Najib S.Z. Performance analysis of shell and tube heat exchanger: parametric study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2018, vol. 12, pp. 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.07.009>
5. Lychakov V.D., Scheglov A.A., Sivovolov A.S., Matyash A.S., Balunov B.F., Egorov M.Y. An analysis of heat transfer in assemblies of finned heat-exchange elements. *Thermal Engineering*, 2022, vol. 69, no. 3, pp. 202–209. <https://doi.org/10.1134/S0040601522030089>
6. Darbandi M., Abdollahpour M.-S., Hasanpour-Matkolaei M. A new developed semi-full-scale approach to facilitate the CFD simulation of shell and tube heat exchangers. *Chemical Engineering Science*, 2021, vol. 245, pp. 116836. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116836>
7. Bizhan K.G., Mohammad R.D., Hossein P. Prediction of kinematic viscosity of petroleum fractions using artificial neural networks. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 51–65.
8. Boda M.A., Bhasagi P.N., Sawade A.S., Andodgi R.A. Analysis of kinematic viscosity for liquids by varying temperature. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2015, vol. 4, no. 4, pp. 1951–1954. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0404020>
9. Lee B.I., Kesler M.G. A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states. *AIChE Journal*, 1975, vol. 21, no. 3, pp. 510–527. <https://doi.org/10.1002/aic.690210313>
10. Aralov O.V., Buyanov I.V., Savanin A.S., Iordansky E.I. Research of methods for oil kinematic viscosity calculation in the oil-trunk pipeline. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2017, vol. 7, no. 5, pp. 97–105. (in Russian)
11. Yogesh S.S., Selvaraj A.S., Ravi D.K., Rajagopal T.K.R. Heat transfer and pressure drop characteristics of inclined elliptical fin tube heat exchanger of varying ellipticity ratio using CFD code. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 119, pp. 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.094>
12. Chen K., Mohammed H.I., Mahdi J.M., Rahbari A., Cairns A., Talebizadehsardari P. Effects of non-uniform fin arrangement and size on the thermal response of a vertical latent heat triple-tube heat exchanger. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 45, pp. 103723. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103723>
13. Osley W.G., Droegemueller P., Ellerby P. CFD investigation of heat transfer and flow patterns in tube side laminar flow and the potential

14. Karar O., Emami S., Gounder S.M., Myo Thant M.M., Mukhtar H., Shariffpur M., Sadeghzadeh M. Experimental and numerical investigation on convective heat transfer in actively heated bundle-pipe // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2021. V. 15. N 1. P. 848–864. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1920466>
15. Rana S., Zunaid M., Kumar R. CFD approach for the enhancement of thermal energy storage in phase change material charged heat exchanger // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. V. 33. P. 101921. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101921>
16. Allouche Y., Varga S., Bouden C., Oliveira A.C. Validation of a CFD model for the simulation of heat transfer in a tubes-in-tank PCM storage unit // *Renewable Energy*. 2016. V. 89. P. 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.038>
17. Balaji D., Prakash L.S.S. CFD analysis of a pressure drop in a staggered tube bundle for a turbulent cross flow // *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2016. V. 3. N 2. P. 35–40. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2016.3209>
18. Czarnota T., Wagner C. Turbulent convection and thermal radiation in a cuboidal Rayleigh–Bénard cell with conductive plates // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2016. V. 57. P. 150–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.10.006>
19. Mohanan A.K., Prasad B.V., Vengadesan S. Flow and heat transfer characteristics of a cross-flow heat exchanger with elliptical tubes // *Heat Transfer Engineering*. 2021. V. 42. N 21. P. 1846–1860. <https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1826742>
20. Тугунов П.И., Новоселов В.Ф., Коршак А.А., Шаммазов А.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов. М.: Дизайн Полиграф Сервис, 2002. 234 с.
21. Кириллов П.Л., Юрков Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990. 360 с.
22. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1974. 408 с.
23. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
24. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. V. 32. N 8. P. 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
25. Menter F., Esch T., Kubacki S. Transition modelling based on local variables // *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*. Elsevier, 2002. P. 555–564. <https://doi.org/10.1016/b978-008044114-6/50053-3>
26. Langtry R.B., Menter F.R. Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes // *AIAA Journal*. 2009. V. 47. N 12. P. 2894–2906. <https://doi.org/10.2514/1.42362>
27. Coder J.G., Maughmer M.D. Computational fluid dynamics compatible transition modeling using an amplification factor transport equation // *AIAA Journal*. 2014. V. 52. N 11. P. 2506–2512. <https://doi.org/10.2514/1.j052905>
28. Menter F.R., Smirnov P.E., Liu T., Avancha R. A one-equation local correlation-based transition model // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2015. V. 95. N 4. P. 583–619. <https://doi.org/10.1007/s10494-015-9622-4>
29. Gorji S., Seddighi M., Ariyaratne C., Vardy A.E., O'Donoghue T., Pokrajac D., He S. A comparative study of turbulence models in a transient channel flow // *Computers and Fluids*. 2014. V. 83. P. 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.10.037>
30. Volkov K. Numerical analysis of Navier–Stokes equations on unstructured meshes // *Handbook on Navier–Stokes Equations: Theory and Analysis*. Nova Science, 2016. P. 365–442.
31. Volkov K. Multigrid and preconditioning techniques in CFD applications // *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications*. Springer, 2018. P. 83–149. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70945-1_6
- for enhancement. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, vol. 35, pp. 997–1002. <https://doi.org/10.3303/CET1335166>
14. Karar O., Emami S., Gounder S.M., Myo Thant M.M., Mukhtar H., Shariffpur M., Sadeghzadeh M. Experimental and numerical investigation on convective heat transfer in actively heated bundle-pipe. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 848–864. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1920466>
15. Rana S., Zunaid M., Kumar R. CFD approach for the enhancement of thermal energy storage in phase change material charged heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, vol. 33, pp. 101921. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101921>
16. Allouche Y., Varga S., Bouden C., Oliveira A.C. Validation of a CFD model for the simulation of heat transfer in a tubes-in-tank PCM storage unit. *Renewable Energy*, 2016, vol. 89, pp. 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.038>
17. Balaji D., Prakash L.S.S. CFD analysis of a pressure drop in a staggered tube bundle for a turbulent cross flow. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2016, vol. 3, no. 2, pp. 35–40. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2016.3209>
18. Czarnota T., Wagner C. Turbulent convection and thermal radiation in a cuboidal Rayleigh–Bénard cell with conductive plates. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2016, vol. 57, pp. 150–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.10.006>
19. Mohanan A.K., Prasad B.V., Vengadesan S. Flow and heat transfer characteristics of a cross-flow heat exchanger with elliptical tubes. *Heat Transfer Engineering*, 2021, vol. 42, no. 21, pp. 1846–1860. <https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1826742>
20. Tugunov P.I., Novoselov V.F., Korshak A.A., Shammazov A.M. *Standard Calculations for the Design and Operation Of Petroleum Storage Depots and Oil Pipelines*. Moscow, Dizajn Poligraf Servis Publ., 2002, 234 p. (in Russian)
21. Kirillov P.L., Iurev Iu.S., Bobkov V.P. *Handbook of Thermal-Hydraulic Calculations (Nuclear-Power Reactors, Heat Exchangers, Steam Generating Units)*. Moscow, Jenergoatomizdat, 1990, 360 p. (in Russian)
22. Petukhov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A. *Heat transfer in nuclear power plants*. Moscow, Atomizdat Publ., 1974, 408 p. (in Russian)
23. Kutateladze S.S. *Heat Transfer and Hydrodynamical Resistance*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990, 367 p. (in Russian)
24. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
25. Menter F., Esch T., Kubacki S. Transition modelling based on local variables. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, Elsevier, 2002, pp. 555–564. <https://doi.org/10.1016/b978-008044114-6/50053-3>
26. Langtry R.B., Menter F.R. Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes. *AIAA Journal*, 2009, vol. 47, no. 12, pp. 2894–2906. <https://doi.org/10.2514/1.42362>
27. Coder J.G., Maughmer M.D. Computational fluid dynamics compatible transition modeling using an amplification factor transport equation. *AIAA Journal*, 2014, vol. 52, no. 11, pp. 2506–2512. <https://doi.org/10.2514/1.j052905>
28. Menter F.R., Smirnov P.E., Liu T., Avancha R. A one-equation local correlation-based transition model. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2015, vol. 95, no. 4, pp. 583–619. <https://doi.org/10.1007/s10494-015-9622-4>
29. Gorji S., Seddighi M., Ariyaratne C., Vardy A.E., O'Donoghue T., Pokrajac D., He S. A comparative study of turbulence models in a transient channel flow. *Computers and Fluids*, 2014, vol. 83, pp. 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.10.037>
30. Volkov K. Numerical analysis of Navier–Stokes equations on unstructured meshes. *Handbook on Navier–Stokes Equations: Theory and Analysis*. Nova Science, 2016, pp. 365–442.
31. Volkov K. Multigrid and preconditioning techniques in CFD applications. *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications*, Springer, 2018, pp. 83–149. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70945-1_6

Авторы

Курманова Динара Есентаевна — докторант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, 010008, Республика Казахстан, <https://orcid.org/0009-0009-9787-7426>, dikonya89_29@mail.ru

Джайчибеков Нурболат Жумабекович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, 010008, Республика Казахстан, [sc 57195809348, https://orcid.org/0000-0002-3053-8288](https://orcid.org/0000-0002-3053-8288), jaich@mail.ru

Authors

Dinara E. Kurmanova — Doctoral Student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Kazakhstan, <https://orcid.org/0009-0009-9787-7426>, dikonya89_29@mail.ru

Nurbolat Zh. Jaichibekov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Full Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Kazakhstan, [sc 57195809348, https://orcid.org/0000-0002-3053-8288](https://orcid.org/0000-0002-3053-8288), jaich@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.03.2023
Одобрена после рецензирования 11.05.2023
Принята к печати 16.07.2023

Received 10.03.2023
Approved after reviewing 11.05.2023
Accepted 16.07.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»