

МРНТИ: 50.51.15

Д.Е. Курманова

*Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Казымукана, 13,
Астана, 010008, Казахстан
(E-mail: dikonya89_29mail.ru)*

Численное моделирование параметров теплоносителей в теплообменниках геликоидной формы

Аннотация: Статья посвящена численному моделированию теплообменных процессов в теплообменнике геликоидной формы. Здесь используется интенсифицированный теплообменник. Это теплообменник, представляющий собой закреплённый в спиральношовном корпусе пучок профилированных трубок (в данной статье представлен случай одной трубки для нагреваемого и одной трубки для нагревающего теплоносителей) из коррозионностойкого материала, через стенки которых осуществляется теплопередача от потока греющей среды к потоку нагреваемой. Трубки имеют геликоидный профиль. Основное отличие теплообменников такой конструкции заключается именно в профилированной теплообменной поверхности трубок. В работе применен гибридный подход: получение зависимостей при сложных переходных процессах течения теплоносителя (нефти) с сильно изменяющейся вязкостью из численного эксперимента и построение замкнутой математической модели теплообмена для теплообменника. В работе приведены результаты расчетов температурного поля нефти в зависимости от различных гидродинамических параметров. Численное моделирование динамики нефти решалось в программном комплексе Ansys Fluent, где были использованы стационарные уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу. Численное моделирование течения жидкости и теплопередачи включает численное решение уравнений непрерывности, импульса и переноса энергии в вычислительной области в декартовых координатах. Для дискретизации основных уравнений используется метод конечных объемов на неструктурированных сетках и метод Coupled. Дискретизация невязких потоков осуществляется при помощи схемы MUSCL (Monotonic Upstream Schemes for Conservation Laws), а вязких потоков - центрированная схема 2-го порядка точности. В расчетах используется неравномерная сетка, в которой сгущение ячеек сетки производится около стенок трубы, где градиент температуры нефти является существенным. Чтобы контролировать сходимость итерационного процесса, проверяется уровень расхождения искомых физических величин и соответствие уравнению баланса массы. Исследование чувствительности сетки состоит из запуска одного и того же моделирования с использованием сеток с разным разрешением и анализируется, насколько сильно сходящееся решение меняется с каждой сеткой. Разрешение сетки около стены фиксировано на уровне $y^+ < 1$, а количество ячеек сетки в оставшейся части расчетной области (часть области, находящейся вне инфляционного слоя) варьируется. Чувствительность сетки на результат оценивается по распределению температуры в выходном участке трубы. Расчеты завершаются, когда уровень расхождения всех физических величин уменьшается на три порядка, а рассогласование массовых расходов на входной и выходной границах расчетной области становится менее 10^{-3} кг/с.

Ключевые слова: теплообмен, численное моделирование, геликоидный теплообменник, нефтепродукт.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7182/bulmathenu.2024/1.2>

2000 Mathematics Subject Classification: 35.M11

1. ВВЕДЕНИЕ

Теплообменники используются во многих областях применения, при этом эффективные теплообменники являются основным требованием отрасли. Усилия по увеличению теплопередачи, увеличению скоростей теплопередачи, уменьшению размеров теплообменников и повышению эффективности предпринимаются с начала глобальной индустриализации. Более высокий потенциал теплопередачи спиральных змеевиков представляет интерес для многих исследователей, изучающих динамику жидкости внутри спиральных труб теплообменника, который они обслуживают. Изгиб трубы вызывает приложение центробежной силы, которая приводит к образованию вторичного потока из-за искривления трубы. Жидкости, вытекающие снаружи трубы, движутся с большей скоростью, чем те, что текут внутри трубы, что вызвано кривизной, влияющей на скорость перемещения [1]. В конструкции геликоидных теплообменников применяются профилированные трубки и ребра винтового профиля, приводящие к улучшению условия теплообмена. В работах [2, 3] приводятся моделирование и расчет гидродинамики теплоносителей (вода, нефть), протекающих по гладким трубам. В работе [4] приводится численное моделирование и расчет теплообмена между теплоносителями в теплообменных аппаратах. В работе [5] приводится моделирование влияния параметров на теплопередачу и характеристики потока жидкости в геликоидальных двухтрубных теплообменниках. Работа [6] посвящена параметрическому анализу спиралевидного теплообменника с различными корреляциями параметров.

В работе [7] были проанализированы спиральные змеевики в теплообменниках различной формы и условий эксплуатации и проведено сравнение с прямотрубными теплообменниками, а их производительность и эффективность были проанализированы путем изучения факторов, влияющих на производительность и эффективность спирального теплообменника, таких, как коэффициент кривизны и другие факторы. Спиральный змеевик в теплообменниках обеспечивает более высокие скорости и эффективность теплопередачи, чем прямые трубы и другие теплообменники, благодаря развитию вторичного потока внутри спиральной трубы, в то время как коэффициент теплопередачи увеличивается с увеличением коэффициента кривизны при тех же скоростях потока.

В настоящей работе рассматривается численный расчет теплообменника геликоидного типа. Мы здесь используем интенсифицированный теплообменник. Это теплообменник, представляющий собой закреплённый в спиральношовном корпусе пучок профилированных трубок (в данной статье представлен случай одной трубки для нагреваемого и одной трубки для нагревающего теплоносителей) из коррозионностойкого материала (нержавеющей стали), через стенки которых осуществляется теплопередача от потока греющей среды к потоку нагреваемой. Трубки имеют геликоидный профиль. Основное отличие теплообменников такой конструкции заключается именно в профилированной теплообменной поверхности трубок. Приводятся результаты расчета температуры нефти и теплового потока на выходе из трубы, имеющей на поверхности навивки. При решении данной задачи в качестве входных параметров варьировались число закруток N , коэффициент теплоотдачи, скорость течения и температура нефти на входе в трубу.

2. МЕТОДЫ

Задача решается в программном комплексе Ansys Fluent 2019 R3, где использованы стационарные уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу, (RANS, Reynolds-averaged Navier-Stokes).

В вычислительной процедуре используется алгоритм временного марширования. Интегрирование по времени выполняется методом Рунге-Кутты 3-го порядка. Невязкие потоки дискретизируются с помощью схемы MUSCL (монотонные восходящие схемы для законов сохранения), а вязкие потоки дискретизируются с помощью центрированной схемы 2-го порядка. Схема MUSCL позволяет увеличить порядок аппроксимации

пространственных переменных без потери монотонности решения, удовлетворяет условию TVD (уменьшение общей вариации) и является комбинацией центрированных конечных разностей 2-го порядка и диссипативного члена, переключение между которыми осуществляется ограничителем потока, построенным на основе характеристических переменных. Навивки и закрутки в трубке с холодным теплоносителем задаются в виде граничных условий третьего рода - в тепловом потоке (Thermal Condition) выбирается конвекция (Convection) (на поверхности трубы задавались коэффициенты теплоотдачи α_1 и температура омывающей жидкости T_2). В качестве метода решения выбран Pressure-Velocity Coupling Scheme - Coupled. Этот метод обладает некоторыми преимуществами по сравнению с алгоритмом разделения на основе давления. Связанный алгоритм, основанный на давлении, обеспечивает более надежную и эффективную однофазную реализацию для стационарных потоков.

На входном участке трубы задается массовый расход, а к выходному участку применяются граничные условия свободного истечения. Внешняя труба считается идеально изолированной при задании адиабатических граничных условий на стенке.

Схематически рассчитываемая труба с навивками и расчетной сеткой на ней показана на рисунке 1.

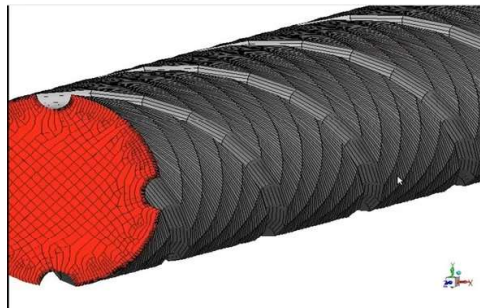


Рисунок 1 – Расчетная сетка трубы с навивками

Для экономии вычислительных ресурсов (времени и памяти) расчет проводился на четвертой части трубы, так как труба осесимметричная. Используется метод конечных объемов на неструктурированных сетках [8]. Сетка состоит из 705795 узлов и 657696 элементов. Сгущение ячеек сетки производится около стенок трубы таким образом, чтобы $y^+ < 2$. y^+ - безразмерная пристеночная координата, расстояние от стенки до первого пристеночного узла используется только вблизи стенки.

Для расчета были использованы основные уравнения Навье-Стокса и уравнения $k - \omega$ SST [9].

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0;$$

Уравнение импульса:

$$v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right];$$

Уравнение энергии:

$$v_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right].$$

Здесь ρ – плотность, а v_i – составляющая скорости в направлении координат x_i , p – давление, T – температура, ν – кинематическая вязкость жидкости, ν_t – турбулентная вязкость, Pr, Pr_t – число Прандтля для ламинарного и турбулентного соответственно.

Модель $k - \omega$ турбулентности включает в себя два дополнительных уравнения переноса. Одно уравнение записано для импульса начала перехода и числа Рейнольдса $Re_{\theta t}$ (оно включено в корреляцию между местоположением начала перехода и местоположением

переходного процесса), а другое уравнение выведено для перемежаемости γ (мера режима течения).

Уравнения переноса для импульсной толщины и числа Рейнольдса и перемежаемости имеют вид:

$$v_j \frac{\partial Re_{\theta t}}{\partial x_j} = P_{\theta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_{\theta t} (\nu + \nu_t) \frac{\partial Re_{\theta t}}{\partial x_j} \right];$$

Уравнение для перемежаемости:

$$v_j \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} = P_{\gamma} - E_{\gamma} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\gamma}}) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right];$$

Здесь $P_{\theta t}$ – является производным от числа Рейнольдса толщины импульса, P_{γ} и E_{γ} – условия образования и диссипации перемежаемости, $\sigma_{\theta t}$ и σ_{γ} – константы модели.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Так как системы исходных уравнений являются нелинейными, при их численном решении применялся итерационный подход, в котором решались линеаризованные уравнения Навье-Стокса. По результатам расчетов получены среднемассовая температура и тепловой поток нефти на выходе из трубы. Для решения данной задачи использованы следующие исходные параметры: радиус трубы $R_1 = 0,006$ м, радиус канавки $R_2 = 0,001$ м, длина трубки $L_1 = 1$ м, коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура омывающей жидкости (вода) $T_2 = 423$ К, скорость течения нефти $v_1 = 4$ м/с, температура нефти на входе в трубу $T_{in1} = 313$ К. Число навивок на поверхности трубы определяется количеством закруток N , которые в данной задаче варьировались от 1 до 40 с интервалом в 5.

На рисунке 2 а) показан график зависимости среднемассовой температуры нефти на выходе из трубы от числа закрутки N . Как видно из рисунка, с увеличением числа закруток температура нефти на выходе растет, т.е. происходит интенсификация теплообмена между теплоносителями. На рисунке 2 б) приведен график зависимости от числа закруток N . Здесь количество теплового потока также растет с увеличением числа закруток на трубе.

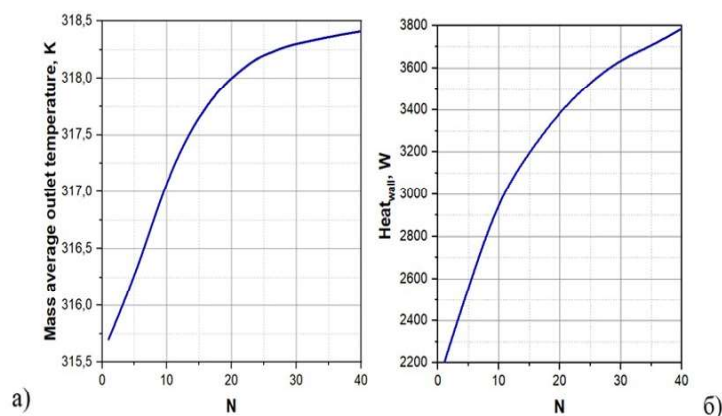


Рисунок 2 – Зависимости среднемассовых температур на выходе из теплообменника а) и теплового потока через поверхность трубы со стороны омывающей жидкости б) от закруток N

Далее, задавались коэффициенты теплоотдачи α в пределах от $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $6000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при постоянном числе закруток, равным 10. Так, на рисунке 3 а) приведен график зависимости среднемассовой температуры нефти на выходе из теплообменника от коэффициента теплоотдачи α . Как видно из рисунка, с увеличением коэффициента теплоотдачи среднемассовая температура на выходе значительно растет.

На рисунке 3 б) приводится зависимость от теплоотдачи α . Как видно из графика, с увеличением коэффициента теплоотдачи тепловой поток существенно возрастает,

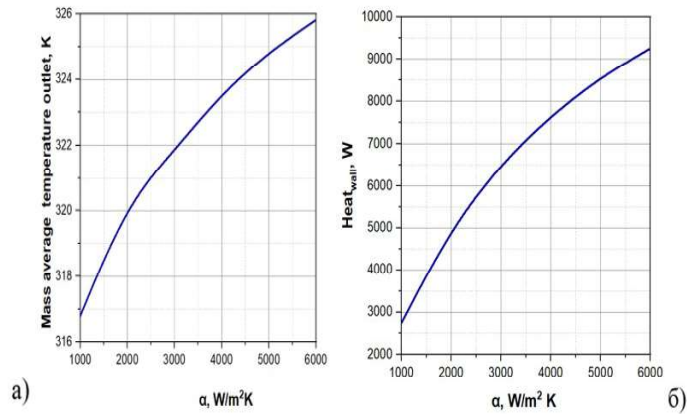


Рисунок 3 – Зависимости среднемассовых температур на выходе из теплообменника а) и теплового потока через поверхность трубы со стороны омывающей жидкости б) от коэффициента теплоотдачи α

примерно в 3 раза от начального значения, что показывает интенсификацию теплообмена между теплоносителями.

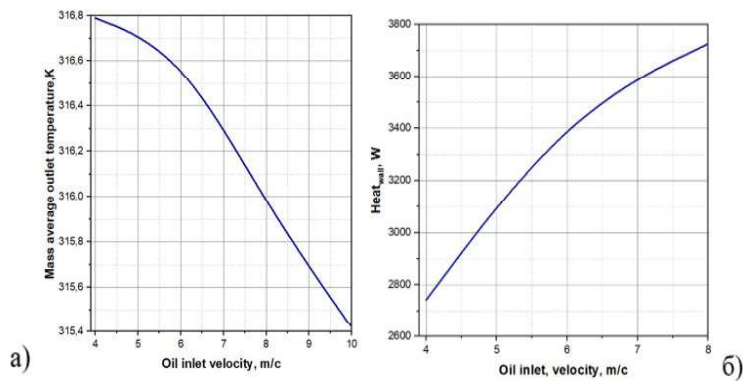


Рисунок 4 – Зависимости среднемассовых температур на выходе из теплообменника а) и теплового потока через поверхность трубы со стороны омывающей жидкости б) от скорости течения нефти на входе

На рисунках 4 а) и б) приведены графики зависимостей среднемассовой температуры и теплового потока через поверхность от скорости течения нефти v на входе. Из рисунка видно, что при скорости $v = 6$ м/с, число Рейнольдса достигает $Re = 2880$, где происходит ламинарно-турбулентный переходный режим.

Варьируя температуру нефти на входе в трубу от 313K до 363K , получаем рост температуры нефти на выходе из теплообменника, график зависимости которой приведен на рисунке 5 а). Из графика видно, что эта зависимость имеет линейный характер. Обратная картина наблюдается на рисунке 5 б), где показана зависимость теплового потока на поверхности трубы от температуры на входе. Видно, что с увеличением температуры нефти на входе разность между температурой нефти и температуры омывающей жидкости (тепловой поток) уменьшается.

На рисунке 6 приведены сравнительные графики зависимости среднемассовой температуры нефти на выходе для трубки с гладкой и геликоидной поверхностью с числом закруток N от 10 до 40 с шагом 10. Как видно из рисунка, для геликоидной трубки теплообмен происходит интенсивнее, это объясняется тем, что за счет навивок увеличивается площадь теплового потока.

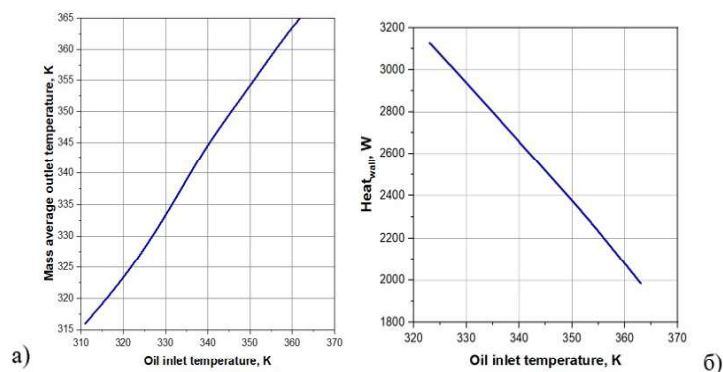


Рисунок 5 – Зависимости среднемассовых температур на выходе из теплообменника а) и теплового потока через поверхность трубы со стороны омывающей жидкости б) от температуры на входе

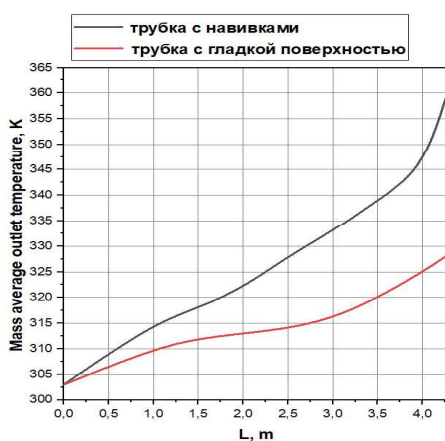


Рисунок 6 – Зависимость среднемассовой температуры нефти на выходе для трубки с гладкой и геликоидной поверхностью с числом закруток $N = 10 - 40$

В литературе в качестве экспериментальных данных в основном приведена зависимость числа Нуссельта (Nu) от числа Рейнольдса (Re). У нас же приведена зависимость теплового потока от скорости течения нефти на входе, которую можно пересчитать через число Рейнольдса. Сравнение результатов расчета в виде зависимости чисел (Nu) и (Re) предполагается осуществить в следующих расчетах и показать эти данные в очередной статье.

4. Выводы

Таким образом, из приведенных результатов можно заключить, что теплообменники с геликоидными формами (на примере трубки с навивками) имеют более лучшие показатели по теплообменным свойствам, чем теплообменники с гладкими трубками. Это связано с тем, что закрученные навивки приводят к турбулизации потока нефти, из-за чего повышается теплообмен между слоями жидкости за счет диффузионного процесса. Также на повышение температуры нефти влияет небольшое увеличение поверхности трубки за счет выемок, что увеличивает поток тепла через поверхность трубки. Исследования показали, что значение среднемассовой температуры нефти на выходе из трубки в геликоидном теплообменнике в отличие от теплообменника с гладкими трубками интенсивнее, достигает максимального значения, что составляет 9,45%.

Список литературы

- 1 Borse D, Bute J.V. A Review on Helical Coil Heat Exchanger // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. -2018. -№6. -P.492-497. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.2070>
- 2 Курманова Д.Е., Джайчибеков Н.Ж., Волков К.Н., Карпенко А.Г. Численный расчет гидродинамики теплоносителей с учетом зависимости вязкости от температуры // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. Серия Математика. Компьютерные науки. Механика. -2022.- Том 141. №4. - С.28-41. <https://doi.org/10.32523/2616-7182/bulmathenu.2022/4.2>
- 3 Курманова Д.Е. Распределение температуры теплоносителей вдоль теплообменного аппарата // Сборник материалов XVII международной научной конференции студентов и молодых ученых "GYLYM JANE BILIM - 2022". -Астана, 2022. - С. 1603-1607. <https://smart.enu.kz/api/serve?path=/general/files/6c96824d-24df-4d98-83a3-67ddd36551e.pdf>
- 4 Kurmanova D.Y., Jaichibekov N. Zh., Karpenko A.G., Volkov K.N.. Numerical modeling and calculation of heat transfer between heat carriers in heat exchangers // Вестник Карагандинского университета. Серия "Физика". - 2023. -Т. 109. -№1. - С. 59-70. DOI 10.31489/2023PH1/59-70
- 5 Mehrabi M., Pesteci S., Pashae G., T. Modeling of heat transfer and fluid flow characteristics of helicoidal double-pipe heat exchangers using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) // International Communications in Heat and Mass Transfer. - 2011. -Т. 38. -P. 525-532.
- 6 Pramod S. Purandarea , Mandar M. Leleb , Rajkumar Gupta. Parametric Analysis of Helical Coil Heat Exchanger // International Journal of Engineering Research and Technology. -2012. - Vol. 1. Is. 8.
- 7 Inyang U, Uwa I. Heat Transfer in Helical Coil Heat Exchanger // Advances in Chemical Engineering and Science. -2022. -12. -P. 26-39. doi: 10.4236/aces.2022.121003.
- 8 Волков К.Н., Емельянов В.Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа: учебное пособие.- Москва: ФИЗМАТЛИТ. -2012.- 468 с.
- 9 Kurmanova D., Jaichibekov N., Karpenko A., Volkov K. Modelling and Simulation of Heat Exchanger with Strong Dependence of Oil Viscosity on Temperature // Fluids. -2023.-8. -95.-P.1-18. <https://doi.org/10.3390/fluids8030095>

Д.Е. Курманова

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан, 13, Астана, 010008, Қазақстан

Геликоидты жылу алмастырғыштағы жылу тасымалдағыш параметрлерін сандық модельдеу

Аннотация: Мақала тақырыбында геликоидты жылу алмастырғыштағы жылу алмасу процестерін сандық модельдеуге арналған. Мұнда қарқынды жылу алмастырғыш қолданылады. Бұл коррозияға төзімді материалдан жасалған профильді түтіктердің спираль тәрізді корпусына бекітілген жылу алмастырғыш (бұл мақалада жылытылатын түтікке арналған бір түтік және қыздырғыш салқындатқыштарға арналған бір түтік), олардың қабырғалары арқылы жылыту ортасының ағынынан қыздырылатын түтікке жылу беру жүзеге асырылады. Түтіктердің геликоидты профилі бар. Бұл дизайнға жылу алмастырғыштардың негізгі айырмашылығы дәл түтіктердің профильді жылу алмасу бетінде жатыр. Жұмыста гибриді тәсіл қолданылады: сандық эксперименттен тұтқырлығы қатты өзгертін жылу тасымалдағыш (мұнай) ағынының күрделі өтпелі процестеріне тәуелділіктерді алу және жылу алмастырғыш үшін жылу алмасудың тұйықталған математикалық моделін құру. Жұмыста әртүрлі гидродинамикалық параметрлерге байланысты мұнайдың температуралық өрісін есептеу нәтижелері келтірілген. Мұнай динамикасының сандық модельдеуі Ansys Fluent бағдарламалық кешенінде шешілді, онда Рейнольдс бойынша орташа Навье-Стокс стационарлық теңдеулері қолданылды. Сұйықтық ағыны мен жылу беруді сандық модельдеу декарттық координаттары есептеу аймағындағы үздіксіздік, импульс және энергия тасымалдау теңдеулерінің сандық шешімін қамтиды. Негізгі теңдеулерді іріктеу үшін құрылымдалмаған торлардағы шекті көлем әдісі және Coupled әдісі қолданылады. Тұтқыр емес ағындарды іріктеу MUSCL (monotonic Upstream Schemes for Conservation Laws) схемасы арқылы жүзеге асырылады, ал тұтқыр ағындар - дәлдіктің 2-ші ретгі орталықтандырылған схемасы. Есептеулерде біркелкі емес тор қолданылады, онда тор жасушаларының қалыңдауы мұнай температурасының градиенті маңызды болатын құбырдың қабырғаларына жақын жерде жасалады. Итерациялық процестің конвергенциясын бақылау үшін қажетті физикалық шамалардың алшақтық деңгейі және масса балансының теңдеуіне сәйкестігі тексеріледі. Тордың сезімталдығын зерттеу әртүрлі ажыратымдылықтағы торларды қолдана отырып, бірдей модельдеуді жүргізуден тұрады және әр торда конвергентті шешімнің қаншалықты өзгертін талданады. Қабырғаға жақын тордың ажыратымдылығы $y^+ < 1$ деңгейінде бекітілген, ал есеп айырысу аймағының қалған бөлігіндегі тор ұяшықтарының саны (инфляциялық қабаттан тыс аймақтың бөлігі) өзгереді. Нәтижеге арналған тордың сезімталдығы құбырдың шығыс бөлігіндегі температураның таралуы бойынша бағаланады. Есептеулер барлық физикалық шамалардың алшақтық деңгейі үш ретке азайған кезде аяқталады, ал есеп айырысу аймағының кіріс және шығыс шекараларындағы жаппай шығындардың сәйкес келмеуі 10^{-3} кг/с-тан аз болады.

Түйін сөздер: жылу алмасу, сандық модельдеу, геликоидты жылу алмастырғыш, мұнай өнімі.

D.Y. Kurmanova

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan str., 13, Astana, 010008, Kazakhstan

Numerical modeling of coolant parameters in helicoid heat exchangers

Abstract: The article is devoted to the numerical simulation of heat exchange processes in a helicoid heat exchanger. An intensified heat exchanger is used here. The heat exchanger used is an intensified one, consisting of a bundle of profiled

Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Mathematics. Computer science. Mechanics series, 2024, Vol. 146, №1

tubes fixed in a spiral-seam housing made of corrosion-resistant material. The article presents the case of one tube for heating and one tube for heated heat carriers. Heat transfer occurs from the flow of the heating medium to the flow of the heated one through tubes with a helicoid profile. The main difference between heat exchangers of this design is the profiled heat exchange surface of the tubes. This paper employs a hybrid approach to obtain dependencies for complex transients of the flow of a coolant (oil) with highly variable viscosity from a numerical experiment and constructing a closed mathematical model of heat transfer for a heat exchanger. The paper presents the results of calculations of the oil temperature field depending on various hydrodynamic parameters. Numerical modeling of oil dynamics was solved in the Ansys Fluent software package, where stationary Navier-Stokes equations averaged by Reynolds were used. The numerical simulation of fluid flow and heat transfer includes the numerical solution of the equations of continuity, momentum and energy transfer in the computational domain in Cartesian coordinates. To achieve this, we use the finite volume method on unstructured grids and the Coupled method to discretize the basic equations. The discretization of inviscid flows is carried out using the MUSCL scheme (Monotonic Upstream Schemes for Conservation Laws), and viscous flows are a centered scheme of the 2nd order of accuracy. The calculations use an uneven grid in which the thickening of the grid cells is performed near the walls of the pipe, where the oil temperature gradient is significant. To control the convergence of the iterative process, the level of discrepancy of the desired physical quantities and compliance with the mass balance equation are checked. The grid sensitivity study consists of running the same simulation using grids with different resolutions and analyzing how much the convergent solution changes with each grid. The resolution of the grid near the wall is fixed at $y^+ < 1$, and the number of grid cells in the remaining part of the calculation area (part of the area outside the inflation layer) varies. The sensitivity of the grid to the result is estimated by the temperature distribution in the outlet section of the pipe. Calculations are completed when the level of discrepancy of all physical quantities decreases by three orders of magnitude, and the mismatch of mass expenditures at the input and output boundaries of the calculated area becomes less than 10^{-3} kg/s.

Keywords: heat transfer, viscosity, hydrodynamics, petroleum products, numerical modeling, laminar-turbulent transition.

References

- 1 Borse, D., Bute, J.V. A Review on Helical Coil Heat Exchanger, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. 2018. №6. P. 492-497. Available at: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.2070>
- 2 Kurmanova D.Y., Jaichibekov N.Zh., Volkov K.N., Karpenko A.G. Chislennyy raschet gidrodinamiki teponositelei s uchetom zavisimosti vyazkosti ot temperatury [Numerical calculation of fluid dynamics of heat carriers taking into account the dependence of viscosity on temperature], Vestnik ENU im.L.N.Gumilyova. Matematika. Komp'uternye nauki. Mekhanika [Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Mathematics. Computer science. Mechanics series]. 2022. Vol. 141. №4. P. 28-41. [in Russian]
- 3 Kurmanova D.Y. Raspreделение temperatury teponositelei vdol' teploobmennogo apparata [Temperature distribution of heat carriers along the heat exchanger], Sbornik materialov XVII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferensii studentov i molodyh uchenykh "GYLYM JANE BILIM - 2022". [Collection of materials of the XVII International Scientific Conference of Students and Young Scientists "GYLYM JANE BILIM - 2022"], 2022. P. 1603-1607. [in Russian]
- 4 Kurmanova D.Y., Jaichibekov N. Zh., Karpenko A.G., Volkov K.N. Numerical modeling and calculation of heat transfer between heat carriers in heat exchangers. Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seria "Fizika" [Bulletin of Karaganda University. Physics Series]. 2023. Vol. 109. №1. P. 59-70.
- 5 Mehrabi M., Pesteei S., Pashaei G., T. Modeling of heat transfer and fluid flow characteristics of helicoidal double-pipe heat exchangers using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), International Communications in Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 38. P. 525-532.
- 6 Pramod S. Purandarea, Mandar M. Leleb, Rajkumar Guptac. Parametric Analysis of Helical Coil Heat Exchanger, International Journal of Engineering Research and Technology. 2012. 1 (02).
- 7 Inyang U. and Uwa I. Heat Transfer in Helical Coil Heat Exchanger, Advances in Chemical Engineering and Science. 12, 26-39. doi: 10.4236/aces.2022.121003.
- 8 Volkov K.N., Emel'yanov V.N. Vychislitel'nye tehnologii v zadachah mehaniki zhidkosti i gaza. [Computational technologies in fluid and gas mechanics problems]. (Fizmatlit, 2012, 468p). [in Russian]
- 9 Kurmanova D., Jaichibekov N., Karpenko A and Volkov K. Modelling and Simulation of Heat Exchanger with Strong Dependence of Oil Viscosity on Temperature, Fluids. 2023. Vol. 95. №8. P. 1-18.

Сведения об авторе:

Курманова Динара. – докторант 3 курса, кафедра Математического и компьютерного моделирования, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Кажымукан, 13, Астана, Казахстан. <https://orcid.org/0009-0009-9787-7426>.

Kurmanova Dinara - 3rd-year doctoral student, Department of Mathematical and computer modeling, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan, 13, Astana, Kazakhstan. <https://orcid.org/0009-0009-9787-7426>.

Поступила: 05.06.2023. После повторной редакции: 29.01.2024.

Одобрена: 29.03.2024. Доступна онлайн: 30.03.2024.