

Михайлов Д.С.

Студент

6 курс, факультет «Общая и техническая физика»

Рыбинский Государственный Авиационно-Технический Университет

Россия, г. Рыбинск

РАСЧЁТ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

***Аннотация.** Работа посвящена моделированию течению потока проводящемуся на основе численного решения системы дифференциальных уравнений, которые в рамках механики сплошных сред описывают движение и тепломассообмен жидкостей или неразреженных газов. Для описания термодинамических и газодинамических характеристик турбулентных течений в квазистационарной постановке уравнения математической модели из классической формы преобразуются методом Рейнольдса и записываются в тензорном виде численным исследованиям процессов тепломассообмена.*

***Ключевые слова:** котельный агрегат, топочная камера, конвективный пучок, экономайзер, контактный теплообменник*

***Abstract.** The work is devoted to modeling the flow of a flow carried out on the basis of a numerical solution of a system of differential equations that describe the motion and heat and mass transfer of liquids or undiluted gases within the framework of continuum mechanics. To describe the thermodynamic and gas-dynamic characteristics of turbulent flows in a quasi-stationary formulation, the equations of the mathematical model from the classical form are transformed by the Reynolds method and written in tensor form to numerical studies of heat and mass transfer processes.*

***Keywords:** boiler unit, furnace chamber, convective beam, economizer, contact heat exchanger*

Область применения: Теплоэнергетика

The work is devoted to modeling the flow of a flow conducted on the basis of the numerical solution of a system of differential equations, which, within the framework of continuum mechanics, describe the movement and heat and mass transfer of liquids or non-rarefied gases. To describe the thermodynamic and gas-dynamic characteristics of turbulent flows in a quasi-stationary formulation, the equations of the mathematical model are transformed from the classical form by the Reynolds method and written in tensor form for numerical studies of heat and mass transfer processes.

Keywords: boiler unit, combustion chamber, convective bundle, economizer, contact heat exchanger

Scope: Thermal power engineering

Список условных обозначений

V_B^0 – теоретическое количество воздуха, м³/ м³;

α – коэффициент избытка воздуха;

Q_p^n – низшая теплота сгорания 1 м³ сухого газа, кДж/ м³;

Q_p^p – располагаемое тепло топлива, кДж/ м³;

Q_2 – потери тепла с уходящими газами, кДж/ м³;

Q_3 – потери тепла химическим недожогом, кДж/ м³;

Q_4 – потери тепла механическим недожогом, кДж/ м³;

Q_5 – потери тепла от наружного охлаждения через ограждающие стенки газоходов котла, кДж/ м³;

Q_T – полезное тепло выделение в топке на 1 м³ топлива, кДж/м³;

q – потери теплоты при работе котла, %;

B_p – расчетный расход топлива, м³/с;

$V_{N_2}^0$ – теоретический объем азота, м³/м³;

$V_{RO_2}^0$ – объем углекислого газа, м³/м³;

V_{Γ}^0 – объем продуктов сгорания $\alpha = 1$, м³/м³;

V_{Γ} – полный объем продуктов сгорания, м³/м³;

$I_{yx.z}$ – энтальпия уходящих газов при избытке воздуха $\alpha_{yx.z}$ и температуре t_{yx} , кДж/ м³;

I^0 – энтальпия продуктов сгорания при $\alpha = 1$, кДж/ м³;

I' – энтальпия воды, кДж/кг;

k – коэффициент поглощения топочной среды, 1/(м·МПа);

s – эффективная толщина излучающего слоя, м;

t_B – температура воздуха, °С ;

t_2 – температура продуктов сгорания, °С ;

t_T'' – температура газов на выходе из топки, °С ;

t_A – адиабатическая температура горения, °С ;

$t_{x.в.}$ – температура холодного воздуха, °С ;

M – параметр, учитывающий влияние на интенсивность теплообмена относительно уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов и других факторов;

ψ_{cp} – среднее значение коэффициента тепловой эффективности экранов;

φ – коэффициент сохранения тепла;

K_{Γ}^0 – коэффициент ослабления лучей трёхатомными газами, (м·МПа)⁻¹;

$\alpha_{л}$ – коэффициент теплоотдачи межтрубным излучением продуктов сгорания, Вт/(м²·К);

α_K – коэффициент теплоотдачи от газов к стенке, Вт/(м²·К);

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

ω – скорость, м/с;

V_T – объем топочной камеры, м³;

H – площадь поверхности нагрева, м²;

F_{CT} – площадь поверхности стен, м²;

d, D – диаметр, м;

l – длина трубочек теплообменника;

Re – число Рейнольдса;

N – мощность, Вт.

Глава 1. РАСЧЁТ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА В ПРОГРАМНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS.

1.1 Физико-математическая модель процессов термогазодинамики в контактном теплообменнике

Моделирование течения потока проводится на основе численного решения системы дифференциальных уравнений, которые в рамках механики сплошных сред описывают движение и тепломассообмен жидкостей или неразрезанных газов. Для описания термодинамических и газодинамических характеристик турбулентных течений в квазистационарной постановке уравнения математической модели из классической формы преобразуются методом Рейнольдса и записываются в тензорном виде.

Система уравнений содержит [13]:

- Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot U) = 0,$$

где ρ – плотность; U – вектор скорости; t – время.

- Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho \cdot U)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot U \times U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau,$$

где p – статическое давление; τ – тензор скоростей деформации.

$$\tau = \mu \cdot \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \cdot \delta \nabla \cdot U \right),$$

где μ – коэффициент динамической вязкости; T – статическая температура; δ – функция Кронекера.

- Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho \cdot i^*)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U \cdot i^*) = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau),$$

где λ – теплопроводность; i^* – полная энтальпия.

$$i^* = i + \frac{1}{2} \cdot U^2;$$

$\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ – член, характеризующий работу по преодолению сил вязкого трения.

В существующих моделях вихревых течений для описания состояния газа используется уравнение идеального газа Менделеева–Клапейрона:

- Уравнение состояния идеального газа.

$$\rho = \frac{\mu \cdot p}{R_\mu \cdot T}; \quad di = c_p dT; \quad c_p = c_p(T),$$

где p – абсолютное давление; R_μ – универсальная газовая постоянная.

В программной среде ANSYS CFX решение системы уравнений производится по методу конечных элементов. Решение системы производится итеративно для каждого элементарного объема расчетной области, после чего производится аппроксимация полученных значений переменных параметров потока.

В $k-\varepsilon$ модели турбулентности используются два дополнительных уравнения для расчета кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации кинетической энергии ε . Буферный слой не моделируется, для расчета скорости у стенки используются пристеночные функции. Благодаря быстрой сходимости и относительно низким требованиям к объему памяти $k-\varepsilon$ модель очень популярна при решении промышленных задач. Она не очень точна при моделировании течений с положительным градиентом давления, струйных течений и течений в области с сильно искривленной геометрией. Модель хорошо подходит для решения задач внешнего обтекания тел сложной геометрической формы.

Уравнение стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности [14]:

$$\frac{dk}{dt} = \nabla \cdot \left(\left(v + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla k \right) + P_k - \varepsilon;$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \nabla \cdot \left(\left(v + \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right) + C_1 \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \rho_k - C_2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{k};$$

$$P_k = v_T \cdot S^2 = -\tau_{ij} \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x_j};$$

$$v_T = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon};$$

$$C_1 = 1,44; C_2 = 1,92; C_\mu = 0,09; \sigma_k = 1; \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

Постоянные значения получены на основе верификации свободных струйных течений. Стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности не пригодна для расчета течений вблизи стенки. Чтобы рассчитывать пристеночные течения, используя $k-\varepsilon$ модель турбулентности можно использовать либо низкорейнольдсовы модели турбулентности или пристеночные функции.

Для моделирования процесса парообразования принято использовать модель кавитации (Cavitation Model), так как напрямую задать процесс вскипания жидкости не представляется возможным. Кавитация – процесс образования пара в областях низкого давления потока жидкости. Это явление часто встречается при эксплуатации технических устройств, таких как насосы и инжекторы.

Для описания кавитационного процесса были предложены различные модели массопереноса, причем наиболее часто используемые подходы основаны на упрощенных формах уравнения Релея-Плиссе [14]. В этой модели объемная доля пара рассчитывается локально из уравнения переноса для массовой доли пара f в формуле (1), которая вводит дополнительные переменные для испарения (R_e) и конденсации (R_c) пара:

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho_m \cdot f) + \nabla \cdot (\rho_m \cdot \bar{v}_m \cdot f) = \nabla \cdot (\Gamma \cdot \nabla f) + R_e - R_c; \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{f}{\rho_v} + \frac{1-f}{\rho_l}, \quad (2)$$

где ρ_m , ρ_v и ρ_l плотности смеси, пара и жидкости соответственно.

Объемную долю пара α можно рассчитать следующим образом:

$$r_g = f \cdot \frac{\rho_m}{\rho_v}. \quad (3)$$

Переменные для испарения и конденсации пара выводятся из приведенной формы уравнения Рэлея-Плиссе:

$$\rho \cdot \left[R_B \cdot \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 \right] = p_B - p - \frac{2\sigma}{R_B} - \frac{4\mu}{R_B} \cdot \frac{dR_B}{dt}. \quad (4)$$

В этом уравнении R_B - радиус кавитационного пузырька, p_B - давление на поверхности пузырька, p - давление в жидкости. Чтобы определить переменные переноса массы, схожие с Эйлеровым многофазным подходом, пренебрегают поверхностным натяжением, вязким торможением для решения уравнения переноса энергии в следующей форме:

$$\frac{dR_B}{dt} \cong (-1)^n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{(p_B - p)}{\rho_l}}, \quad (5)$$

где $n=1$ при расширении или испарении пузырьков пара, а $n=2$ при конденсации пузырьков пара. Используя этот подход, вывели упрощенное уравнение переноса пара:

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho_m \cdot f) + \nabla \cdot (\rho_m \cdot \bar{v}_m \cdot f) = (n \cdot 4 \cdot \pi)^{1/3} + (3 \cdot \alpha)^{1/3} \cdot \frac{\rho_v \cdot \rho_l}{\rho} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot \left(\frac{p_B - p}{\rho_l} \right) \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Все переменные в этом выражении, за исключением n , являются известными константами, либо зависимыми переменными. Чтобы избежать необходимости определять плотность распределения пузырьков, выражение фазового перехода переписывается через переменные радиуса пузырька:

$$R_e = \frac{3\alpha}{R_B} \cdot \frac{\rho_v \cdot \rho_l}{\rho_m} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot \left(\frac{p_B - p}{\rho_l} \right) \right]^{1/2}. \quad (7)$$

Размер пузырька R_B принимается равным максимально возможному размеру пузырьков с использованием корреляции, обычно используемой в ядерной промышленности:

$$R_B = \frac{0,061 \cdot We \cdot \sigma}{2 \cdot \rho_l \cdot u_{rel}^2}, \quad (8)$$

где We – число Вебера, σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Число Вебера в текущей постановке задается следующим выражением:

$$We = \frac{\rho_l \cdot u_l \cdot R_B}{\sigma}, \quad (9)$$

где ρ_l и u_l – плотность и скорости жидкости соответственно.

Дифференциальное уравнение, описывающее рост газовых пузырьков имеет следующий вид [1, 2]:

$$R_B \cdot \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_l \cdot R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_l}, \quad (10)$$

где p_v – давление насыщенных паров при заданной температуре.

Следует отметить, что данное выражение получено из механических соображений без учета тепловых явлений, которые ограничивают рост кавитационных пузырьков.

В (10) пренебрегая производной второго порядка и поверхностным натяжением жидкости получим:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_v - p}{\rho_l}}. \quad (11)$$

Скорость изменения объема и массы сферического пузырька с учетом (11) может быть выражена:

$$\frac{dV_B}{dt} = 4\pi \cdot R_B^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_v - p}{\rho_l}};$$

$$\frac{dm_B}{dt} = 4\pi \cdot R_B^2 \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_v - p}{\rho_l}}, \quad (12)$$

где ρ_g – плотность пара, заполняющего кавитационный пузырек.

Если на единицу объема приходится N_B сферических пузырьков, то объемную долю пара можно выразить как:

$$r_g = \frac{4}{3} \pi \cdot R_B^3 \cdot N_B. \quad (13)$$

С учетом (13) выражение, описывающее суммарную скорость массового перехода жидкости в пар в единице объема, можно записать в виде:

$$m_{lg} = \frac{3r_g \cdot \rho_g}{R_B} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_v - p}{\rho_l}}. \quad (14)$$

Обобщая формулу (14), в случае процесса конденсации пара, можно записать:

$$m_{lg} = F \cdot \frac{3r_g \cdot \rho_g}{R_B} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{|p_v - p|}{\rho_l}} \cdot \text{sign}(p_v - p), \quad (15)$$

где F – эмпирический коэффициент, отвечающий за скорость конденсации и парообразования конкретной жидкости, также учитывающий то, что процесс конденсации проходит значительно медленнее.

В общем случае при численном моделировании радиус пузырька R_B заменяют радиусом ядра кавитационного зародыша R_{nuc} . Однако, для случая парообразования (15) следует преобразовать с учетом того, что в жидкости всегда остается некоторый относительный объем пара r_{nuc} , который не конденсируется. Тогда уравнение (15) примет вид:

$$m_{lg} = F \cdot \frac{3r_{nuc} \cdot (1 - r_g) \cdot \rho_g}{R_{nuc}} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{|p_v - p|}{\rho_l}} \cdot \text{sign}(p_v - p). \quad (16)$$

В ANSYS CFX кавитация реализована как многофазная модель. В большинстве симуляций можно использовать однородную многофазную модель, поскольку часто предполагается, что поле скорости пара совпадает с полем жидкости. В ANSYS CFX при моделировании теплофизических задач, связанных с процессом образования пара предоставляется выбор между моделью Релея-Плиссе (Rayleigh Plesset model) и пользовательской моделью.

При использовании модели Релея-Плиссе необходимо задать следующие параметры. Давление насыщения может быть задано как

постоянная величина или функцией. Так же этот параметр можно учесть в свойствах рабочих веществ.

Для модели Релея-Плиссе ввиду обилия экспериментальных данных по гидравлическим испытаниям получены константы для воды: диаметр кавитационного зародыша $R_{nuc} = 10^{-6}$ мм, неконденсирующийся остаток пара $r_{nuc} = 5 \cdot 10^{-4}$, коэффициент парообразования $F_{vap} = 50$, коэффициент конденсации $F_{cond} = 0,01$. Однако, при необходимости эти параметры можно изменить под конкретную решаемую задачу.

1.2 ПОСТРОЕНИЕ 3D МОДЕЛИ

По результатам теплового расчета котельного агрегата необходимо сконструировать контактный теплообменник-утилизатор для дымовых газа с следующими параметрами (расход 2,16 кг/с, температура 200 градусов).

Контактный теплообменник для котла ТГВ-8М будет представлять собой трубу с установленными в ней форсунками. Для расчета в программном комплексе Ansys нам необходимо создать то пространство, в котором будет происходить смешение дымовых газов и воды.

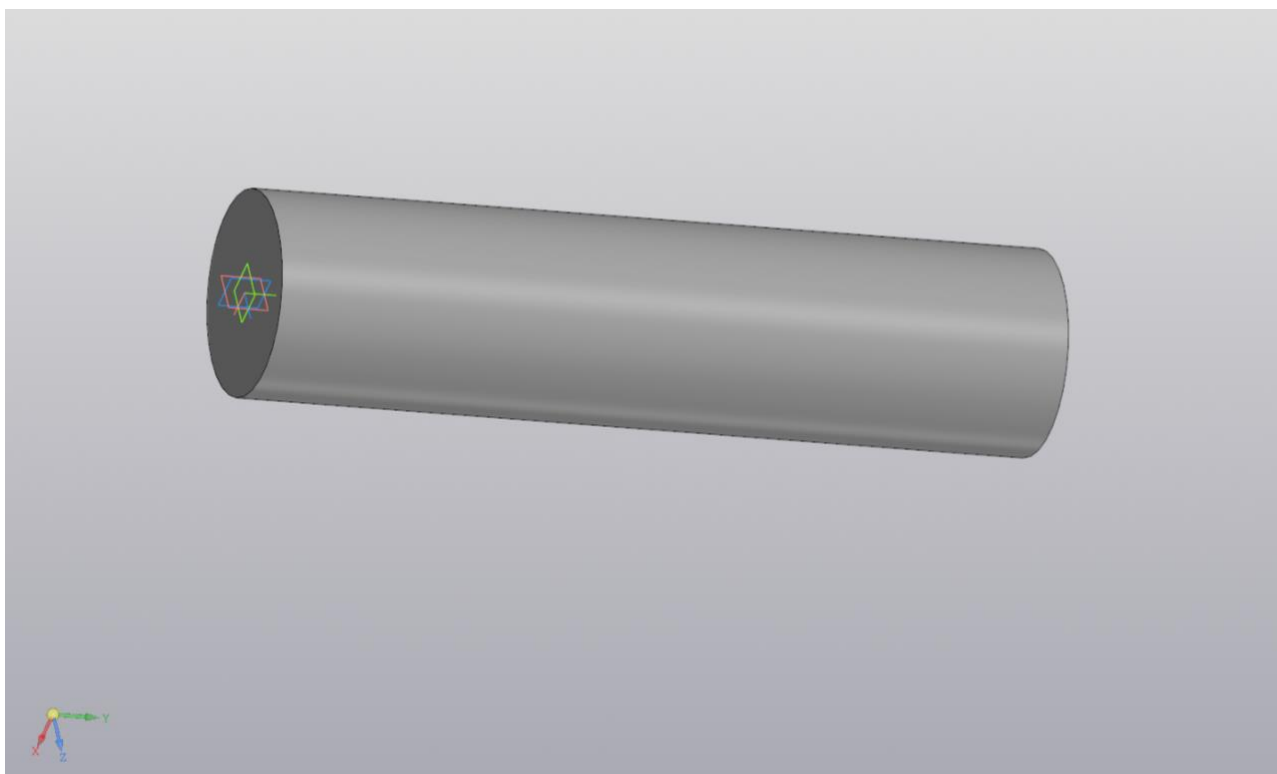


Рис. 3.1 - Пространство для смешения. Модель выполнена в программе Компас 3D

Далее нам необходимо создать для данного пространства сетку в ICEM CFD программного комплекса Ansys. Выбранный тип сетки – структурированная. Связано это с достаточно простой геометрией и ограничением в вычислительных мощностях.

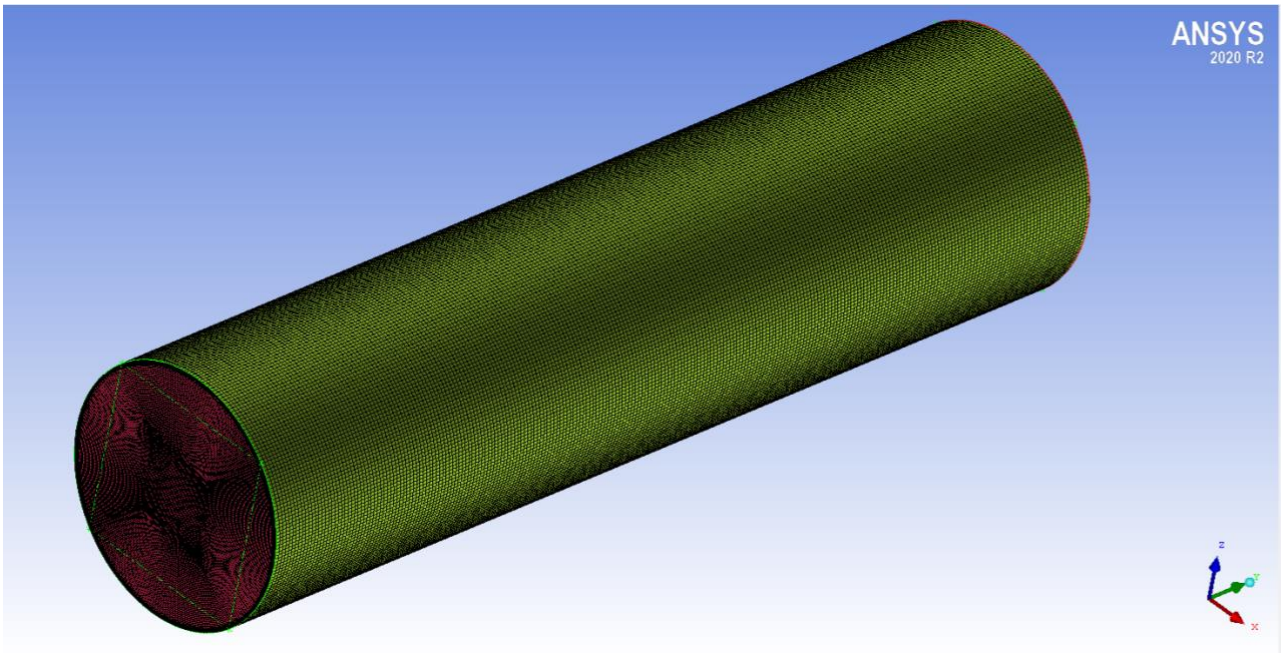


Рис. 3.2 - Сеточная структура в программном комплексе ICEM CFD.

Таблица 3.1 - Характеристики сетки.

Total elements	Min angel	Determinant
4921486	46	0.918

1.3 ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ.

Для выполнения дальнейшего расчёта задаются граничные условия в программе CFX-PRE.

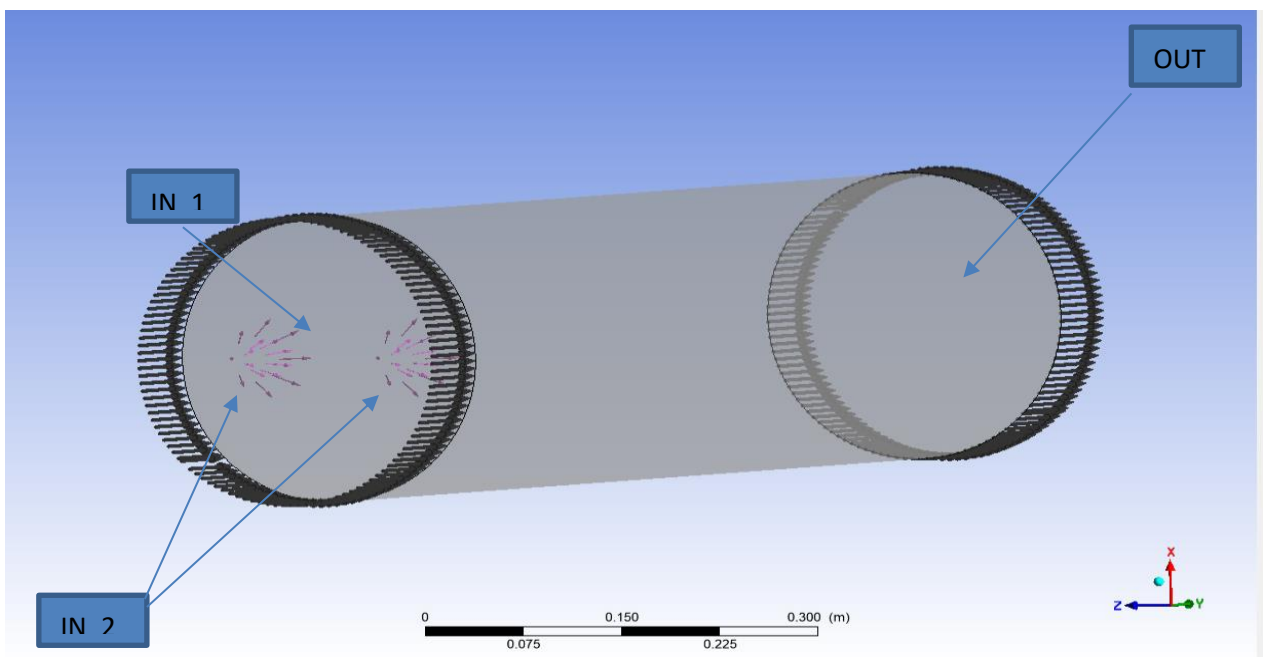


Рис. 3.3 - Задание граничных условий.

Дымовые газы задаются через in_1 массовым расходом. Необходимо учитывать, что скорость дымовых газов в теплообменнике не должна превышать 15 метров в секунду.

Вода для охлаждения дымовых газов подается каплями диаметром 150 микрон через две точки с углом распыления в 28 градусов. Температура воды $t_w=20\text{ }^\circ\text{C}$. Модель распыления ring cone.

На выходе out задается давление в 1 атмосферу.

Стенки адиабатные.

1.4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ.

Расчёты проводились для следующих исходных данных.

Таблица. 3.2 - Изменения исходных данных

№ Расчёта	IN_1 (кг/с)	IN_2 (кг/с)
1	0.5	0,3
2	0.36	0,3

Результаты первого расчета.

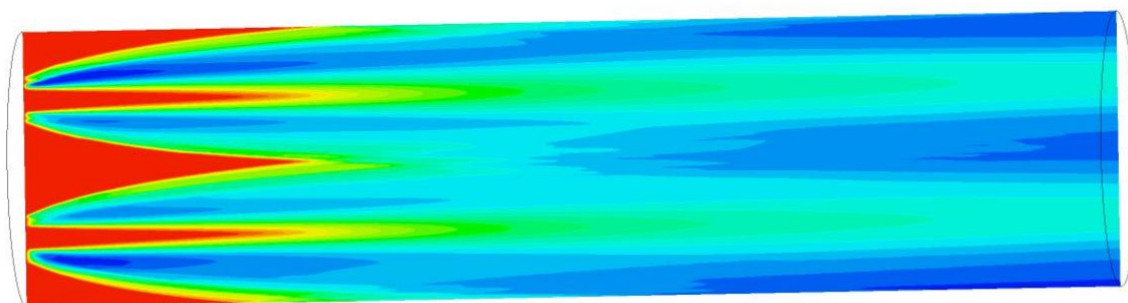
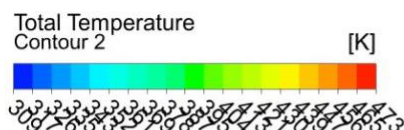


Рис. 3.4 - Распределение температуры смеси дымовых газов и воды.

На данном рисунке наблюдается процесс охлаждения дымовых газов после прохождения им поля с распыленной водой.

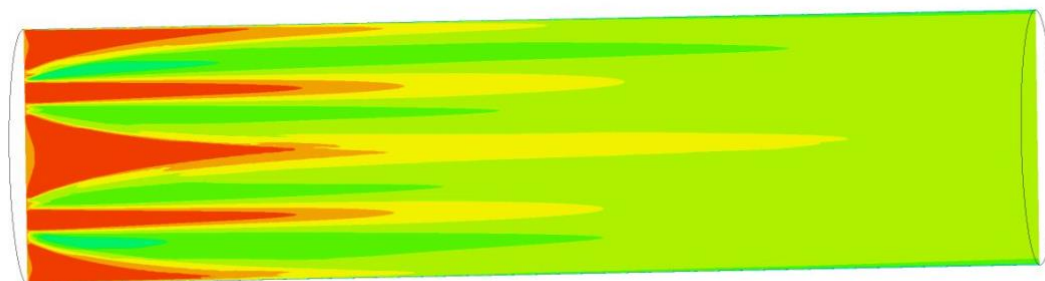
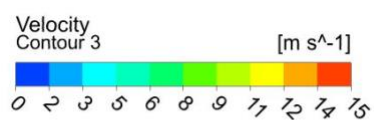


Рис. 3.5 - Поле скорости.

Здесь можно отметить значительное падение скорости дымовых газов в процессе смешивания с водой.

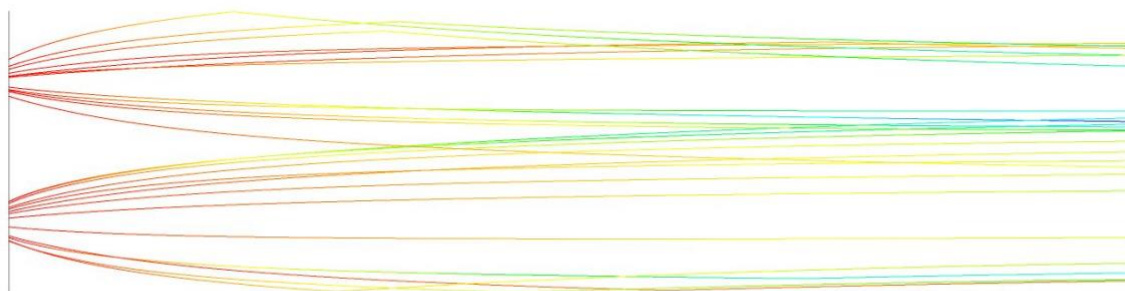
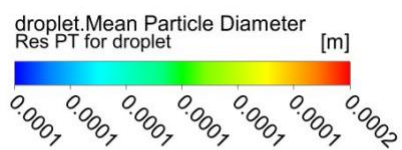


Рис. 3.6 - Объем вылетающих капель.

На рисунке можно заметить постепенное распадение капель на капли меньшего диаметра.

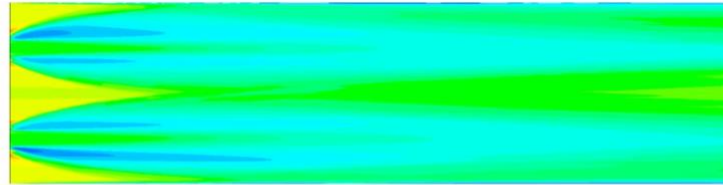
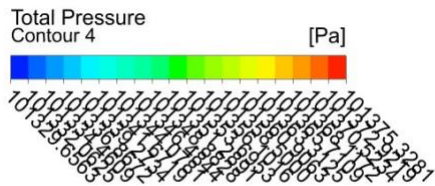


Рис. 3.7 - Распределение давления.

На данном рисунке виден четкий перепад давления в областях соприкосновения капель воды и дымовых газов.

Результаты второго расчета.

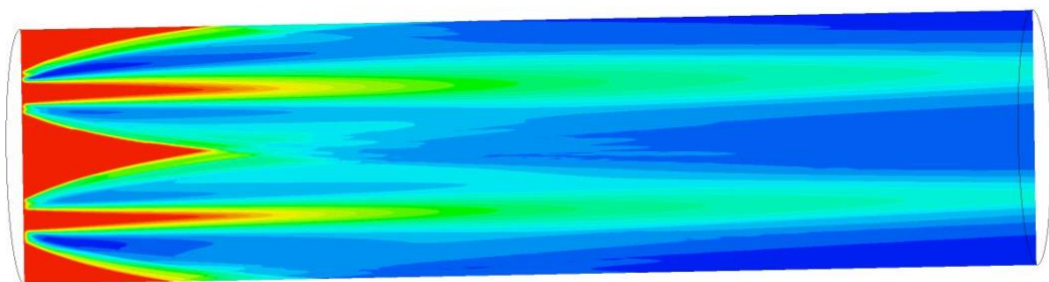
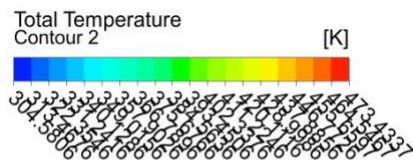


Рис. 3.8 - Распределение температуры смеси дымовых газов и воды.

На данном рисунке наблюдается процесс охлаждения дымовых газов после прохождения им поля с рассеянной водой. Сравнивая с рисунком 7 процесс протекает заметно лучше.

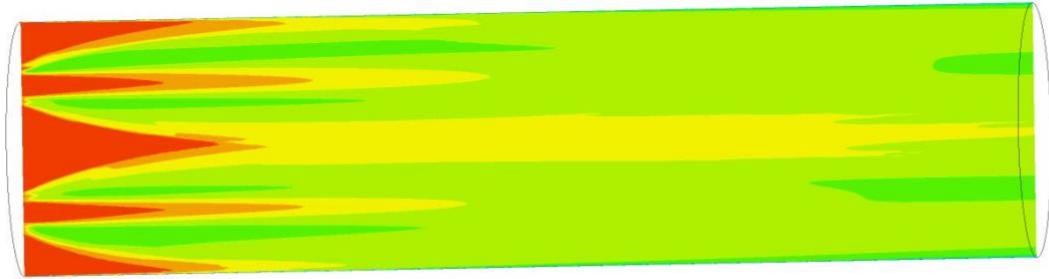
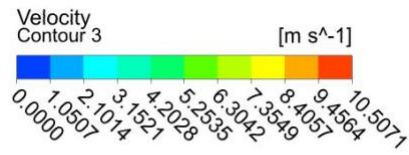


Рис. 3.9 - Поле скорости.

Здесь можно отметить значительное падение скорости дымовых газов в процессе смешивания с водой. По сравнению с 8 рисунком заметно падение скорости.

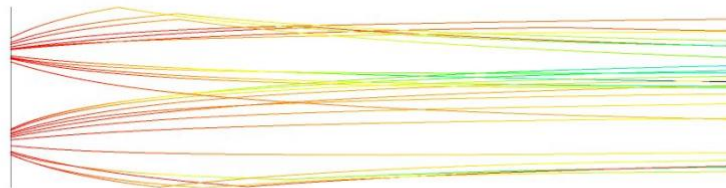
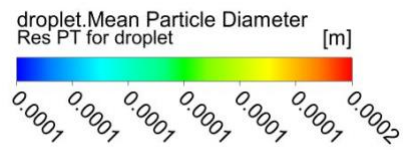


Рис. 3.10 - Объем вылетающих капель.

По сравнению с 9 рисунком не заметны большие изменения.

Заключение

В результате выполненной работы для утилизации тепла дымовых газов котельного агрегата ТВГ 8-м разработан контактный теплообменник – утилизатор, позволяющий утилизировать остаточное тепло уходящих дымовых газов путем его передачи контактным способом охлаждающему теплоносителю – воде. Путем составления численной модели с использованием комплекса ANSYS и проведенных расчетов получено, что при расходе дымовых газов $0,5 \text{ кг/с}$ с $t_{\text{ух}}=200 \text{ }^\circ\text{C}$ на один теплообменник с расходом воды $0,3 \text{ кг/с}$ с температурой $t_{\text{в}}=20 \text{ }^\circ\text{C}$, на входе в теплообменник, происходит охлаждение дымовых газов до $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Для большего снижения температуры дымовых газов, вырабатываемых котельным агрегатом, требуется несколько теплообменников, установленных параллельно.

Список литературы

1. Москалев, Л.Н. Сравнение контактно-вихревого конденсатора с закрученным потоком с поверхностными вихревыми и кожухотрубными конденсаторами / Л.Н. Москалев, С.И. Поникаров, И.И. Поникаров, В.В. Алексеев // Вестник Казанского технологического университета. - 2012. - Т. 15. - №3 - С. 228.
2. Ляндзберг, А.Р. Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке: моно-графия / А.Р. Ляндзберг, А.С. Латкин. - Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004. - 149 с.
3. Таубман, Е.И. Контактные теплообменники / Е.И. Таубман, В.А.Горнев, В.Л. Мельцер и др. - М.: Химия, 1987. - 256 с.
4. Якименко, Л.М. Производство хлора, каустической соды и неорганических хлорпродуктов / Л.М. Якименко. - М.: Химия, 1974. - 600 с.
5. Антонов, В.Н. Производство ацетилена / В.Н. Антонов, А.С. Лapidус. - М.: Химия, 1970. - 415 с.
6. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии / Ю.И. Дытнерский. - 2-е изд., - М.: Химия, 1995. - 400 с.
7. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн./ Н.И. Гельперин. - М.: Химия, 1981. - кн. 1.
8. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. - М.: Государственное научно-техническое изд-во химической литературы, 1961г. - 832с.
9. Биргер, М.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др.; под общ. ред. А.А. Русанова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
10. Ильченко, О.Т. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / О.Т. Ильченко. - Харьков: Высш. Шк. Изд-во при харьк. Ун-те, 1985. - 384с.

11. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Массообменные процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский. - 2-е изд., - М.: Химия, 1995. - 368 с.
12. Кафаров, В.В. Основы массопередачи: учеб. пособие для вузов / В.В. Кафаров. - 2-е изд., переработ. и доп. - М.: «Высшая школа», 1972. - 496 с.
13. Цветков, Ф.Ф. Тепломассобмен: Учебное пособие для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Изд-во МЭИ, 2005. - 550 с.
14. Олевского, В.М. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура / В.М. Олевского - М.: Химия, 1988. - 240 с.
15. Мухленов, И. П. Пенный способ обработки газов и жидкостей / И. П. Мухленов, М. Е. Позин, Э. Я. Тарат, Е. С. Тумаркина // Труды ЛТИ имени Ленсовета. - 1955. - вып. 31 - С. 248.
16. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии / А.Н.Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. - 5-е изд., стереотипное. - Госхимиздат, 1962. - 844 с.
17. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус. - М.: Химия, 1981. - 616 с.
18. Кокорин, О. Я. Установки кондиционирования воздуха / О. Я. Кокорин. - 2-е изд. - М.: Машиностроение, 1978. - 264 с.
19. Стефанов, Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Е.В. Стефанов. - Л.: ЛВВИСКУ, 1982. - 474 с.
20. Шестов, Р.Н. Гидроциклоны / Р.Н. Шестов. - Л.: Машиностроение, 1967. - 78 с.
21. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1976. - 296 с.
22. Вилемас, Ю.В. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи, 2 Ю.В. Вилемас, Г.И. Воронин. - Вильнюс: Мокслас, 1988. - 188 с.
23. Шервуд, Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки. - М.: Химия, 1982. - 696 с.