

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нефтехимии  
и техногенной безопасности

**Усовершенствование методики расчёта закально-испарительного  
аппарата**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студентки 4 курса 431 группы

направления 18.03.01 «Химическая технология»

код и наименование направления, специальности

Института химии

Дмитриевой Евгении Сергеевны

Научный руководитель

профессор, д.т.н.

должность, уч. ст., уч. зв.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Ю.Я.Печенегов

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

д.х.н., профессор

должность, уч. ст., уч. зв.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Р.И. Кузьмина

инициалы, фамилия

Саратов 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Выпускная квалификационная работа содержит 54 страницы, 8 таблиц, 19 рисунков, 27 литературных источников, чертёж закалочно-испарительного аппарата.

Цель работы: разработка усовершенствованной методики расчёта закалочно-испарительных аппаратов.

Актуальность темы связана с исключительной важностью закалочно-испарительных аппаратов в процессах пиролиза при производстве низших олефинов. Так, при недостаточной закалке газов, развиваются побочные процессы и теряются большие количества целевых продуктов. Особенность расчёта закалочно-испарительных аппаратов связана с реализацией в них неизотермических потоков пиролизного газа, к расчёту теплообмена и гидравлического сопротивления которых на сегодняшний день не существует единого подхода.

Поведение газовых теплоносителей при их интенсивном охлаждении и нагревании в трубах изучали многие исследователи и теоретическим, и практическим путями. Все они дают сильно различающиеся между собой рекомендации для расчётов. В связи с этим при выполнении выпускной квалификационной работы основными задачами были:

- Сравнить подходы различных авторов к гидравлическому расчёту неизотермических потоков;
- Сравнить подходы различных авторов к тепловому расчёту неизотермических потоков;
- Выбрать наиболее универсальные формулы.

Как результат – был проведён сравнительный расчёт конкретного закалочно-испарительного аппарата по традиционной и предлагаемой методикам и предложена усовершенствованная методика расчёта.

Выпускная квалификационная работа состоит из двух разделов: «литературный обзор» и «расчётная часть».

Литературный обзор состоит из семи подразделов:

1. Пиролиз. Основы процесса;
2. Закалка и охлаждение газов пиролиза;
3. Закально – испарительные аппараты;
4. Общая методика расчёта закально-испарительных аппаратов;
5. Гидравлическое сопротивление неизотермических потоков;
6. Теплообмен неизотермических потоков;
7. Обобщение литературных данных и постановка задач.

Расчётная часть состоит из девяти подразделов:

1. Влияние неизотермичности на физико-химические свойства газов;
2. Влияние температурного фактора на гидравлическое сопротивление;
3. Влияние температурного фактора на теплообмен;
4. Сравнение методов расчёта гидравлического сопротивления;
5. Сравнение методов теплового расчёта;
6. Закально-испарительный аппарат, как объект расчёта;
7. Расчёт закально-испарительного аппарата с учётом неизотермичности потока;
8. Расчёт изотермического потока;
9. Сравнение результатов расчётов.

Предлагаемая методика основывается на формулах, наилучшим образом, описывающих поведение газовых потоков при их охлаждении и учитывающим индивидуальные свойства газовых теплоносителей. По ним рассчитываются коэффициент теплоотдачи со стороны газа и гидравлического сопротивления трению.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Пиролиз – процесс термического разложения сырья. Он имеет большое значение в современной мировой нефтехимии.

Назначением пиролиза углеводородов является получение ценных полупродуктов - низших олефинов. Они находятся в газообразном состоянии и из реактора выходят при температурах 700- 800° С. В связи с этим на выходе

из пиролизных печей устанавливают закалочно-испарительные аппараты, позволяющие снизить температуру продуктов, а значит, предотвратить побочные реакции, потери ценных целевых продуктов и закоксовывание.

Закалочно-испарительные аппараты существуют многих типов: труба в трубе, смешения, насадочные, с псевдоожиженным слоем промежуточного теплоносителя, пластинчатые. Но чаще всего используют кожухотрубные.

Общую методику расчёта кожухотрубных закалочно-испарительных аппаратов можно разделить на две основные части: тепловой расчёт и гидравлический.

При расчёте уже имеющегося аппарата со своими конструктивными параметрами (материал, длина труб, их количество, расположение, диаметр и т.д.) целью теплового расчёта становится установление его производительности по газу. В тепловом расчёте используются следующие зависимости.

Основным параметром, определяющим работу теплообменного аппарата является его тепловая мощность. Она определяется по основному уравнению теплопередачи

$$Q = KF\Delta t, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь теплопередачи,

$\Delta t$  - движущая разность температур (температурный напор),

$K$  – коэффициент теплопередачи.

Чаще всего температурный напор потоков определяется как среднелогарифмическая между большей и меньшей разностями температур на концах аппарата

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln(\Delta t_{\text{б}}/\Delta t_{\text{м}})}. \quad (2)$$

Основная проблема данного расчета заключается в определении коэффициента теплопередачи, так как он является сложной функцией от расходов теплоносителей, режима их движения и их физических свойств

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + r_1 + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + r_2 + 1/\alpha_2} \quad (3)$$

Коэффициенты теплоотдачи определяются уравнением

$$\alpha_B = Nu_B \frac{\lambda_B}{d_{вн}} \quad (4)$$

Все указанные параметры влияют на числа Нуссельта, к расчёту которых пока нет единого подхода. В общем виде зависимость для их определения имеет вид:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr, \Gamma_1, \Gamma_2 \dots) \quad (5)$$

В традиционном подходе все физические свойства теплоносителей принимаются при их средней температуре. Представим некоторые зависимости.

При движении изотермического потока теплоносителя в прямых трубах круглого сечения без изменения агрегатных свойств [12]:

а) при турбулентном движении ( $Re > 2300$ )

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (6)$$

б) при ламинарном течении ( $Re < 2300$ )

$$Nu = 0,15 (Re Pr)^{0,33} (Gr Pr)^{0,1} \quad (7)$$

Существует универсальная формула Михеева, справедливая в широких интервалах чисел Рейнольдса

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (8)$$

Для неизотермических потоков применяются другие зависимости, учитывающие переменность их свойств в зависимости от температуры, влияющую в свою очередь на числа Рейнольдса и Прандтля, входящих в зависимости указанные выше.

Исходя из тепловой мощности можно вычислить потоки теплоносителей исходя из теплового баланса

$$Q_{г} = Q_{х} \quad (9)$$

$$Q = G(h_2 - h_1) \quad (10)$$

Целью гидравлического расчёта является установление перепада давления на входе и выходе из аппарата для выбора нагнетающего устройства. В ходе гидравлического расчёта вычисляют полную потерю давления по формуле

$$\Delta p = \Delta p_1 + z(\Delta p_2 + \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_3) + \Delta p_4, \quad (11)$$

где  $\Delta p$  - общее сопротивление, Па;

$\Delta p_1$  - потеря давления при выходе потока из штуцера в распределительную камеру теплообменника, Па;

$\Delta p_2$  - потеря давления при входе потока из распределительной камеры в трубы теплообменника, Па;

$\Delta p_{\text{тр}}$  - потеря давления на трение в трубах теплообменника, Па;

$\Delta p_3$  - потеря давления при выходе потока из труб, Па;

$\Delta p_4$  - потеря давления при входе потока в штуцер теплообменника, Па;

$z$  – число ходов в теплообменнике.

Основная трудность в гидравлическом расчёте состоит в определении потери давления на трение. Этот расчёт использует величину коэффициента трения ( $\xi_0$ ), расчёт которого неоднозначен. При традиционном походе все физические свойства для теплоносителя находятся при средней температуре потока. Представим некоторые зависимости.

Для относительно гладких труб справедливо уравнение Блазиуса

$$\xi_0 = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad (12)$$

При значительных шероховатостях формулу Альтшуля

$$\xi_0 = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad (13)$$

Кроме этого, на практике довольно часто используется формула Филоненко, справедливая в широких интервалах чисел Рейнольдса  $Re = 4 \cdot 10^3 \dots 10^{12}$ .

$$\xi_0 = (1,821 \cdot \lg Re - 1,64)^{-2} . \quad (14)$$

Все зависимости, указанные выше, справедливы лишь для изотермических потоков. Для неізотермических вносят поправки на переменность свойств.

Следует отметить, что для жидких теплоносителей эта поправка близка к единице, так как их свойства с температурой изменяются незначительно. Однако, для газовых теплоносителей неізотермичность вносит существенные изменения.

Так, в выпускной квалификационной работе анализируются свойства тех газов, что входят в большом количестве в состав пиролизного газа. Приводятся сводные графики, на которых видно, что в диапазоне рабочих температур интересующие при расчётах физические свойства (динамическая вязкость, теплопроводность, плотность) могут изменяться вплоть до 5 раз.

При этом характер температурных зависимостей довольно сильно отличается от газа к газу. Это наводит на мысль о необходимости индивидуального подхода к газам при расчётах – в то время как, в большинстве методиках расчёты проводятся усреднённым способом, и не отличаются друг от друга при рассмотрении, например, воздуха и многоатомных углеводородных газов.

При выполнении выпускной квалификационной работы были изучены различные способы учёта переменности свойств газовых теплоносителей от температуры. Так, в большинстве случаев, исследователи вносят в формулы для изотермических потоков температурную поправку. Эта поправка представляет собой различного рода функциональные зависимости температурного фактора – отношения температур стенки трубы к средней температуре потока. В основном – степенные зависимости. Однако, степень

по мнению различных исследователей сильно колеблется. Это можно отобразить графически.

Так, на рисунке 1 представлено изменение коэффициента трения в зависимости от температурного фактора по результатам исследований различных авторов.

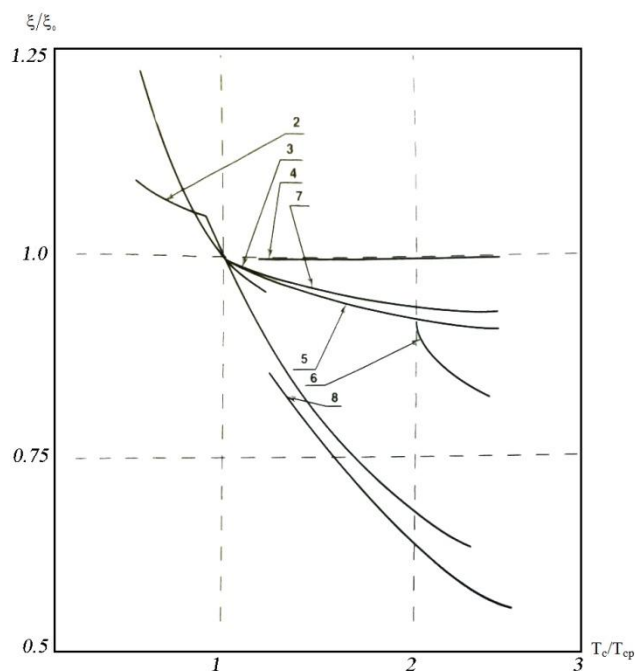


Рисунок 1 – Изменение коэффициента трения в зависимости от температурного фактора по данным разных авторов:

- 1 – Sieder E.N, Tate G.E.; 2 – Ильин Л.Н.; 3 – Аладьев И.Т.; 4 – Аресеев А.В.;  
5 – Иващенко Н.И; 6 – Лельчук В.Л, Дядякин Б.В; 7 – Дубровин И.В.

Как видно из представленного графика имеются сильные разногласия при расчётах, проводимых различными авторами. В выпускной квалификационной работе анализируются различные подходы, проводятся сравнительные расчёты для образцового газа – воздуха, а также для газов, входящих в состав газов пиролиза. Расчёты по разным методикам сравниваются с экспериментальными данными исследователей. На основании этого выбирается наиболее универсальная формула для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления трению. Особенностью этой формулы становится индивидуальный подход к газам, учёт атомности рассматриваемого газа. Проводится ряд расчётов по выбранной формуле для



разных газов. В зависимости от атомности газа результаты отличаются процентов на 60%, что доказывает необходимость и рациональность подобного подхода.

Аналогично рассматривается процесс теплопередачи. Так, на рисунке 2 представлено изменение теплоотдачи в зависимости от температурного фактора по мнению различных исследователей.

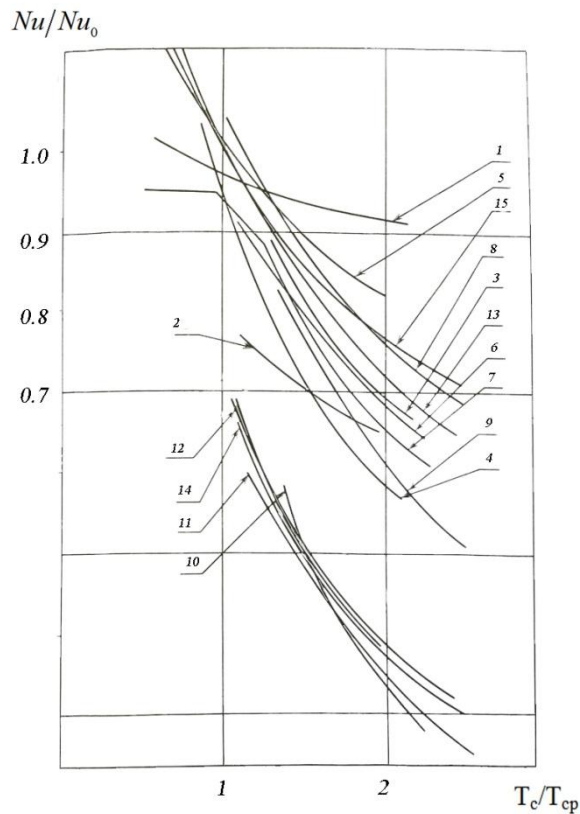


Рисунок 2 – изменение теплоотдачи в зависимости от температурного фактора по данным разных авторов:

- 1 - Аладьев И.Т.; 2 – Арсеев А.В.; 3 – Иващенко Н.И.; 4 – Дубровин И.В.; 5 – McCarthy J.R.; 6 – Кириллов В.В., Малюгин Ю.С.; 7 – Ильин Л.Н.; 8 – Петухов Б.С., Попов В.Н.; 9 – Dagle, Donne, Browdich F.; 10 – Perkins H.C.; 11 – McEglot D. et.al.; 12 – ЦКТИ; 13 – Taylor M.F.; 14 - Ляхов В.К., Кугай В.И.; 15 – Петухов Б.С.

Аналогично проводятся сравнительные расчёты и выбирается формула для расчёта коэффициента теплоотдачи со стороны газа.

Основываясь на выбранных в ходе сравнительных расчётов формулах проводится расчёт конкретного закалочно-испарительного аппарата конструкции ВНИПИнефть: тепловой и гидравлический.

По трубному пространству движется пиролизный газ, охлаждаясь от  $730^{\circ}\text{C}$  до  $400^{\circ}\text{C}$ . По межтрубному – вода, которая нагревается и превращается в пар высокого давления (40 атм.), используемый далее на энергетических установках.

Закалочно-испарительный аппарат условно делится на две части. В первой газ, охлаждаясь, отдаёт тепло на нагрев воды. Во второй – на испарение воды. Проводился отдельный расчёт обоих участков по традиционной методике и по выбранным формулам. В ходе расчётов применялся метод итераций.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Объектом рассмотрения в выпускной квалификационной работе стали закалочно-испарительные аппараты, и главным образом – охлаждаемые в них неизотермические потоки пиролизного газа.

В работе изучены изменения свойств газовых потоков в зависимости от температуры. Было выявлено, что в интервалах температур, реализуемых в ЗИА, эти свойства могут отличаться до 5 раз. Было проанализировано влияние этих свойств на гидравлическое сопротивление и процесс теплообмена. При охлаждении газового потока потери на трение могут возрасти до 2,5 раз, а теплоотдача изменяться до 5 раз. Кроме этого, было выявлено, что для разных газов эти зависимости имеют существенные различия, что ставит под сомнение возможность усреднения свойств газовых потоков, что традиционно принято при расчётах.

Были рассмотрены подходы различных авторов к расчёту коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи для неизотермических потоков. По итогам расчётов и их сравнения с экспериментальными данными были выбраны наиболее универсальные формулы, хорошо описывающие поведение газовых потоков при их

охлаждении. В отличие от традиционных, они не усредняют свойства газов, а учитывают их индивидуальные свойства, что позволяет производить более точные расчёты.

Основываясь на выбранных формулах, был произведён расчёт конкретного кожухотрубчатого закалочно-испарительного аппарата, распространённого на российских производствах. Параллельно был выполнен расчёт по традиционной методике. Итогом стали существенно различающиеся данные по падению давления в аппарате и расходу пиролизного газа, максимально возможного для охлаждения до заданных технологически температур.

Результатом работы стало предложение усовершенствованной методики расчёта закалочно-испарительных аппаратов. Сама методика и логика расчётов остались неизменными, но были заменены формулы для расчёта коэффициента теплоотдачи от газа и коэффициента гидравлического сопротивления трению. Это связано с сильной неизотермичностью газового потока, изменению физических свойств по оси и длине труб – и как следствие значительным влиянием на процессы теплопередачи и трения.