

УДК 66.01.011

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ ПАРЦИАЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПАРОВОЙ СМЕСИ

© Е.Ю. Филатова, Е.Н. Туголуков, О.В. Ведишева

Filatova E.Y., Tugolukov E.N., Vedischeva O.V. Calculation of the heat exchanger for partial condensations of multicomponent steam mixtures. The purpose of the investigation is production of calculation methods of heat exchange equipment, based on the solutions of the differential equations system of heat conductivity in partial derivatives for temperature fields modeling during partial condensation of a multicomponent steam mixture.

В настоящее время расчет теплообменного оборудования, используемого для фазовых превращений многокомпонентных паровых смесей, ведется по стандартным методикам, которые могут давать большие погрешности, обусловленные отсутствием учета изменения теплофизических свойств многокомпонентной смеси, коэффициентов теплоотдачи, удельных тепловых потоков, количества образовавшегося конденсата по длине зоны теплообмена.

В связи с этим для реализации современных ресурсо- и энергосберегающих технологий разработка новых подходов к расчету теплообменного оборудования, обеспечивающих учет локальных характеристик тепловых процессов, является актуальной.

Целью данной работы является выработка методики расчета теплообменного оборудования, основанной на использовании решений системы дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных для моделирования температурных полей в процессе парциальной конденсации многокомпонентной паровой смеси.

Предлагается процесс конденсации многокомпонентной паровой смеси описывать с использованием закона нормального распределения [1]:

$$S(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) dt, \quad (1)$$

где l – длина зоны теплообмена, м; m – математическое ожидание; σ – дисперсия.

Для каждого компонента многокомпонентной смеси строится своя функция распределения $S_i(t)$, характеризующая количество сконденсированного компонента многокомпонентной смеси при текущей температуре. Для расчета параметров этих кривых достаточно знать координаты двух точек, лежащих на соответствующей кривой, которые могут определяться экспериментальным путем.

В ходе производства монометиланилина осуществляется процесс парциальной конденсации парогазовой смеси продуктов синтеза при атмосферном давлении, которая включает в себя пары монометиланилина, ани-

лина, метанола, водяные пары и несконденсированные газы. В результате взаимного влияния компонентов процесс конденсации каждого отдельного компонента протекает в определенном диапазоне температур, в котором количество сконденсированного вещества изменяется от 0 до 100 %.

Для построения кривых распределения рассматриваемой многокомпонентной паровой смеси были использованы экспериментальные данные, приведенные в табл. 1.

Используя эту информацию, были рассчитаны значения параметров кривых распределения для компонентов паровой смеси (табл. 2).

Графики по каждому компоненту паровой смеси приведены на рис. 1. Здесь кривые m_1 , m_2 , m_3 , m_4 описывают соответственно изменение доли конденсата монометиланилина, анилина, метанола и воды в зависимости от температуры многокомпонентной смеси.

Таблица 1

Состав конденсата многокомпонентной смеси

Наименование компонента	Доля жидкого компонента, кг/кг смеси	
	$t = 100^\circ\text{C}$	$t = 40^\circ\text{C}$
Монометиланилин	0,575	0,985
Анилин	0,488	0,966
Метанол	0,009	0,44
Вода	0,02	0,265

Таблица 2

Параметры кривых распределения для компонентов паровой смеси

Наименование компонента	σ	m
Монометиланилин	30,29	144,27
Анилин	32,34	150,97
Метанол	27,09	214,09
Вода	42,08	236,43

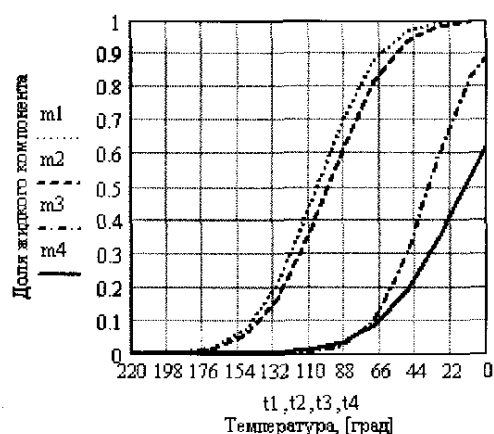


Рис. 1. Семейство кривых распределения для компонентов многокомпонентной паровой смеси

Предложенный способ описания процесса парциальной конденсации многокомпонентных паровых смесей был положен в основу алгоритма расчета теплообменных аппаратов, в которых осуществляется фазовый переход.

Суть расчета состоит в последовательном переборе локальных областей, на которые условно разбивается теплообменный аппарат по длине зоны теплообмена [2]. До момента начала конденсации рассчитывается процесс охлаждения перегретой паровой смеси. Далее определяется момент начала конденсации легколетучего компонента многокомпонентной паровой смеси и для каждой последующей локальной области рассчитывается количество каждого из компонентов, совершивших фазовый переход, а также температурное поле текущей локальной области.

Специфика предложенного алгоритма состоит в том, что для каждой локальной области итеративным путем определяется такая конечная температура смеси, при которой теплота, выделяющаяся при конденсации паров, охлаждении жидких и парообразных компонентов соответствует тепловому потоку, передаваемому к хладагенту при текущих условиях теплообмена.

Особенностью предложенного алгоритма расчета конденсаторов многокомпонентных паровых смесей является своевременный учет появления слоя конденсата на внутренней поверхности трубного пучка. Последнее явление, как правило, ведет к значительному снижению коэффициентов теплоотдачи, а следовательно, к увеличению требуемой поверхности теплообмена.

Таким образом, использование предложенного алгоритма позволяет более точно рассчитать конструктивные параметры конденсаторов многокомпонентных паровых смесей по сравнению со стандартной (классической) методикой.

На основе вышеописанного алгоритма разработана расчетная программа, которая прошла тестирование на примере одноходового кожухотрубчатого теплообменника, применяемого на ОАО «Пигмент» для конденсации многокомпонентной паровой смеси, состоящий из метанола, анилина, монометиланилина и воды.

Был проведен ряд сравнительных расчетов процесса парциальной конденсации многокомпонентных паровых смесей при различной организации процесса.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные для расчета конденсатора

Наименование параметра	Единицы измерения	I вариант	II вариант	III вариант
Массовая доля анилина	кг/кг смеси	0,023		
Массовая доля ММА	кг/кг смеси	0,619		
Массовая доля метанола	кг/кг смеси	0,174		
Массовая доля воды	кг/кг смеси	0,132		
Первая ступень конденсации				
Диаметр кожуха	м	0,406	0,406	0,406
Длина труб	м	3	3	3
Число труб	ед.	110	110	110
Массовый расход паров	кг/с	0,24	0,24	0,24
Массовый расход охлаждающей воды	кг/с	2,15	0,26	0,26
Начальная температура паров	°C	240	240	240
Начальная температура охлаждающей воды	°C	20	20	20
Вторая ступень конденсации				
Диаметр кожуха	м	—	0,406	0,307
Длина труб	м	—	3	2
Число труб	ед.	—	110	61
Массовый расход паров	кг/с	—	0,24	0,24
Массовый расход охлаждающей воды	кг/с	—	1,1	1,2
Начальная температура паров	°C	—	100	100
Начальная температура охлаждающей воды	°C	—	20	20

В результате работы программа формирует таблицы, в которых показано изменение температуры смеси и охлаждающей воды, а также общего и покомпонентного количества конденсата вдоль длины аппарата.

Используя эти данные, построены стационарные температурные поля теплоносителей (рис. 2), а также кривые, описывающие изменение общего и покомпонентного количества конденсата вдоль длины аппарата (рис. 3).

На рис. 2 представлено изменение температуры теплоносителей по длине конденсатора. Отсюда видно, что на длине 0,25 м происходит охлаждение многокомпонентной смеси от начальной температуры (240 °С) до температуры начала конденсации смеси, а вдоль остальной длины аппарата происходит взаимное фазовое превращение компонентов многокомпонентной паровой смеси, причем изменение количества образующегося конденсата каждого компонента по длине теплообменника зависит от текущей температуры парожидкостной смеси.

Анализ графиков температурных полей показал, что процесс полной конденсации осуществлять в одном аппарате длиной 3 м нецелесообразно, т. к. для этого требуется большой расход охлаждающей воды (2,15 кг/с), что объясняется наличием незначительной движущей силы на длине аппарата более двух метров.

Рассмотрим другой способ организации процесса парциальной конденсации многокомпонентной паровой смеси. Предположим, что процесс происходит в двух одинаковых теплообменных аппаратах, работающих последовательно. Причем в первом аппарате температура паровой смеси изменяется от 240 до 100 °С, а во втором – от 100 до 40 °С. На каждой ступени конденсации в качестве охлаждающего агента используется вода комнатной температуры (20 °С). Исходные данные для расчета приведены в табл. 3 (вариант II).

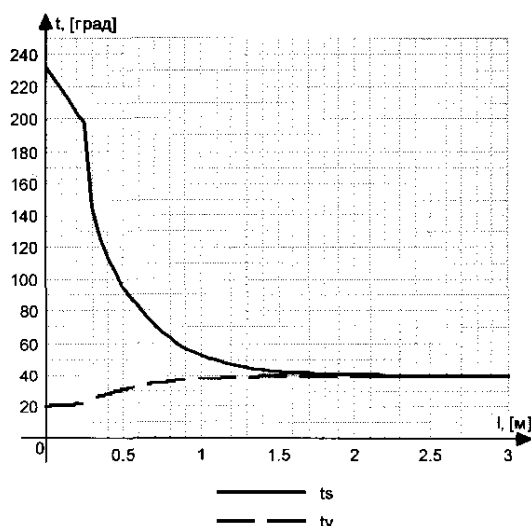


Рис. 2. Стационарные температурные поля теплоносителей в конденсаторе многокомпонентной паровой смеси: t_s – температура многокомпонентной паровой смеси, °С; t_v – температура охлаждающей воды в межтрубном пространстве, °С

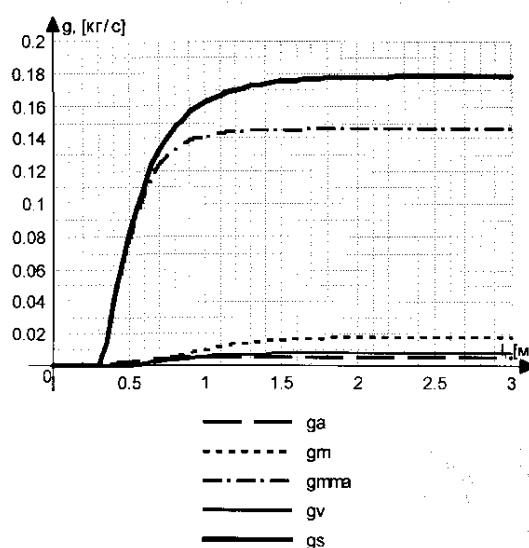


Рис. 3. Изменение общего и покомпонентного количества конденсата вдоль длины аппарата: g_s – общее количество конденсата, кг/с; g_a – количество сконденсированного анилина, кг/с; g_{mta} – количество сконденсированного монометила, кг/с; g_m – количество сконденсированного метанола, кг/с; g_v – количество сконденсированных водяных паров, кг/с

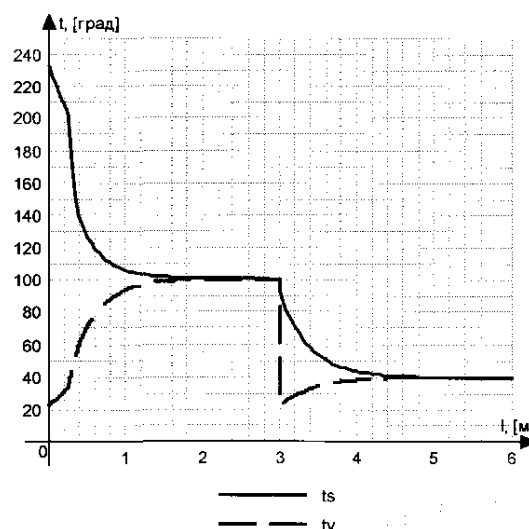


Рис. 4. Стационарные температурные поля теплоносителей при двухступенчатой конденсации многокомпонентной паровой смеси в двух одинаковых аппаратах, работающих последовательно. t_s – температура многокомпонентной паровой смеси, °С; t_v – температура охлаждающей воды в межтрубном пространстве, °С

Температурные поля теплоносителей при двухступенчатой конденсации многокомпонентной паровой смеси представлены на рис. 4.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы. Если процесс конденсации многокомпонентной паровой смеси осуществлять в две ступени в одинаковых теплообменниках, то за счет увеличения движущей силы на входе во второй аппарат воз-

можно снизить расход охлаждающей воды. При такой организации процесса на первой ступени требуется расход охлаждающей воды 0,26 кг/с, на второй – 1,1 кг/с. Следовательно, общий расход охлаждающей воды сокращается более чем в 1,5 раза (с 2,15 до 1,36 кг/с) по сравнению с одноступенчатой конденсацией.

Далее рассмотрим случай двухступенчатой конденсации многокомпонентной паровой смеси в двух неодинаковых аппаратах. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3 (вариант III).

Температурные поля теплоносителей при двухступенчатой конденсации многокомпонентной паровой смеси в двух неодинаковых аппаратах представлены на рис. 5.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы. При незначительном увеличении расхода охлаждающей воды на второй ступени конденсации многокомпонентной паровой смеси можно использовать аппарат с меньшей площадью поверхности теплообмена, что позволит снизить капитальные затраты. При такой организации процесса на первой ступени требуется расход охлаждающей воды 0,26 кг/с, на второй – 1,2 кг/с. В этом случае, общий расход охлаждающей воды увеличится с 1,36 кг/с до 1,46 кг/с по сравнению с процессом конденсации, осуществляемым в двух одинаковых аппаратах.

Таким образом, в результате проведения ряда сравнительных расчетов и их анализа можно сформулировать следующие выводы. Наиболее рациональным является организация процесса парциальной конденсации многокомпонентной паровой смеси в двух последовательно работающих теплообменниках, причем вторую ступень конденсации целесообразно осуществлять в аппарате с меньшей площадью поверхности теплообмена.

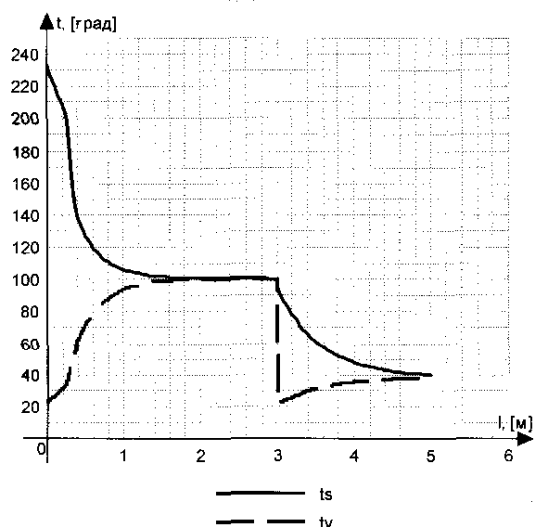


Рис. 5. Стационарные температурные поля теплоносителей при двухступенчатой конденсации многокомпонентной паровой смеси в двух неодинаковых аппаратах: t_s – температура многокомпонентной паровой смеси, °C; t_v – температура охлаждающей воды в межтрубном пространстве, °C

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1998. 576 с.
2. Тугузков Е.Н. Математическое моделирование технологического оборудования многоассортиментных химических производств: монография. М.: Машиностроение, 2004. 100 с.

Поступила в редакцию 20 июля 2006 г.