

УДК 620.9

DOI: [10.34031/ES.2025.4.13](https://doi.org/10.34031/ES.2025.4.13)

Секция Молодых ученых

Энергетика, энерго- и ресурсосбережение в технологиях

## ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧИСЛА ТАРЕЛОК В АТМОСФЕРНОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ МЕТОДОМ МАК-КЭБА-ТИЛЕ

**Смирнов Д.А.****Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент Смирнов Н.Н.**

ИГЭУ, г. Иваново

### Аннотация

В различных отраслях промышленности используется широкое разнообразие жидких и газовых смесей, подлежащих разделению на практически чистые компоненты. Разделение смесей осуществляется в результате многократных контактов жидкой и паровой фаз при их встречном движении в ректификационных установках. Для определения теоретического числа тарелок, необходимых для разделения бинарной смеси в атмосферной ректификационной колонне часто используется графический метод Мак-Кэба-Тиле. Заданными параметрами являются компоненты смеси, концентрации низкокипящего компонента в дистилляте, питательной смеси и кубовом остатке. Определение числа тарелок осуществляется в *x,y*-диаграмме. В MS Excel с использованием VBA была разработана программа, автоматически определяющая теоретическое число тарелок методом Мак-Кэба-Тиле и предоставляющая пошаговое решение инженерной задачи. Расчет доступен для бинарной смеси с использованием этилового, бутилового и метилового спиртов, воды, бензола и толуола.

**Ключевые слова:** ректификация, ректификационная колонна, бинарная смесь, графический метод, фракционирование

## A PROGRAM FOR DETERMINING THE THEORETICAL NUMBER OF PLATES IN AN ATMOSPHERIC DISTILLATION COLUMN USING MCCABE-THIELE METHOD

**Dmitriy Smirnov****Supervisor: Cand. of Tech. Sc. (PhD), Associate Professor Nikolay N. Smirnov**

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo

### Abstract

Various industries widely utilize a variety of liquid and gas mixtures, and various separations into virtually pure components. Separation of mixtures occurs through repeated contact between the liquid and vapor phases as they move in opposite directions in distillation units. The McCabe-Thiele graphical method is often used to determine the theoretical number of plates required to separate a binary mixture in an atmospheric distillation column. The specified parameters are the mixture components and the concentrations of the low-boiling component in the distillate, feed mixture, and still residue. The number of plates is determined using an *x,y* diagram. A program was developed in MS Excel using VBA that automatically determines the theoretical plate number using the McCabe-Thiele method and provides a step-by-step solution to the engineering problem. The calculation is available for ethyl, butyl, and methyl alcohols, water, benzene, and toluene.

**Keywords:** rectification, rectification column, binary mixture, graphical method, fractionation

### Введение

Разделение смесей на практически чистые компоненты возможно только в том в случае, когда компоненты имеют различные температуры насыщения. Ректификация смесей происходит в ректификационных колоннах путем многократных контактов жидкой и паровой фаз компонентов. Для определения теоретического числа тарелок,



необходимого для разделения бинарных смесей, была разработана программа, предоставляющая пошаговый расчет требуемого количества тарельчатых устройств с использованием графического метода Мак-Кэба-Тиле.

### Материалы и методы

Методология: в процессе исследования данного вопроса были использованы методы моделирования и анализа.

### Результаты

Для определения теоретического числа тарелок пользователю необходимо ввести исходные данные:

- 1) концентрация низкокипящего компонента (НКК) в дистилляте;
- 2) концентрация НКК в питательной смеси;
- 3) концентрация НКК в кубовом остатке;
- 4) компоненты смеси.

Таблица с исходными данными представлена на рис. 1.

Исходные данные			
	Обозначение	Численное значение	Размерность
Концентрация НКК в дистилляте	$x_D$	0,9	-
Концентрация НКК в питательной смеси	$x_F$	0,45	-
Концентрация НКК в кубовом остатке	$x_W$	0,05	-
Компонент №1	Вода		
Компонент №2	Этиловый спирт		

Расчет

Новая задача

Рис.1. Исходные данные

Компонентами бинарной смеси могут быть выбраны:

- 1) вода;
- 2) бензол;
- 3) толуол;
- 4) метиловый спирт;
- 5) бутиловый спирт;
- 6) этиловый спирт.

Пользователю необходимо в любом порядке выбрать компоненты, низко- и высококипящая фракции будут определены автоматически.

На рис. 2 представлены параметры компонентов в состоянии насыщения и коэффициенты для определения парциальных давлений компонентов по уравнениям Антуана [1]. Уравнения представлены на рис. 3.

На рис. 4 представлена таблица с данными для построения диаграмм для бинарной смеси «этиловый спирт-вода». В ней представлены:

- температура;
- давления насыщения компонентов;
- концентрации НКК в жидкой и паровой фазе;
- минимальное и оптимальное флегмовое число.

Величины рассчитываются для 10 различных температур в диапазоне от температуры насыщения НКК до температуры насыщения ВКК [2]. При желании пользователь может увидеть в скрытых ячейках более подробные результаты расчетов (для 10 000 значений температур).

По полученным данным строятся диаграммы  $t-x,u$  и  $x,u$ . На рис. 5 представлена диаграмма  $t-x,u$  для смеси «этиловый спирт-вода».



Вещество	Температура кипения $t_{кип}$ , °C	Изобарная теплоемкость $C_p$ , кДж/(кг·K)	Скрытая теплота парообразования $r$ , кДж/кг	ВКК/НКК	Индекс	Молярная масса $\mu$ , кг/кмоль	№ уравнения Антуана	A	B	C
Этиловый спирт	78,3	2,115	895	НКК	A	46,07	-	-	-	-
Вода	100	4,187	2260	ВКК	B	18	2	8,07414	1733	233,84

Рис. 2. Необходимые для расчета параметры НКК и ВКК

57			
58	Уравнение Антуана №1	$\lg\left(\frac{\bar{P}}{133,3}\right) = A - \frac{B}{T}$	
59			
60			
61			
62	Уравнение Антуана №2	$\lg\left(\frac{\bar{P}}{133,3}\right) = A - \frac{B}{C + t}$	
63			
64			
65			
66	Уравнение Антуана для этилового спирта	$\lg\left(\frac{\bar{P}}{133,3}\right) = 11,4178 - \frac{2565}{T} - 0,00352 \cdot T$	
67			

Рис. 3. Уравнения Антуана

**Данные для построения диаграмм**

№	$t$ , °C	$T$ , K	$P_a$ , Па	$P_b$ , Па	$x_a$	$y_a$	Минимальное флегмовое число	Оптимальное флегмовое число
1	78,3	351,45	101325	44358	1	1		
2	80	353,15	108483	47539	0,88	0,94		
3	83	356,15	121894	53621	0,7	0,84		
4	85	358,15	131571	58029	0,59	0,77		
5	87	360,15	141870	62737	0,49	0,69		
6	89	362,15	152821	67762	0,39	0,59		
7	93	366,15	164453	78828	0,26	0,42		
8	96	369,15	176798	88086	0,15	0,26		
9	98	371,15	196720	94749	0,06	0,12		
10	100	373,15	226075	101325	0	0		

Рис. 4. Данные для построения диаграмм

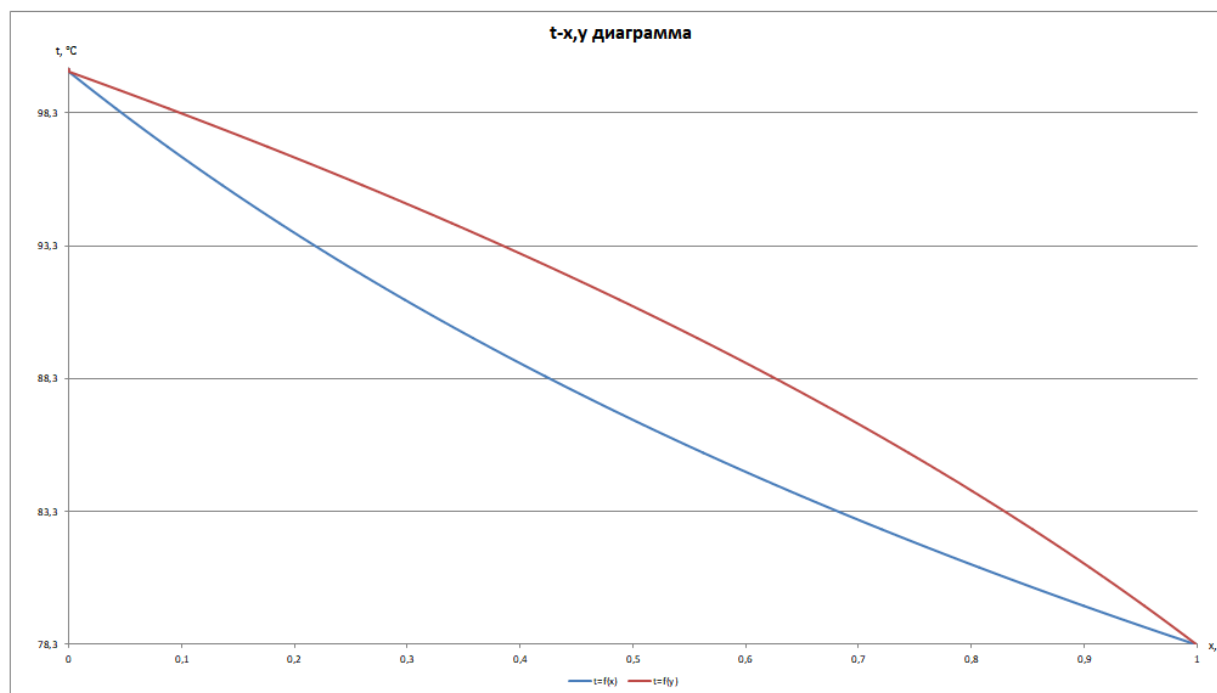
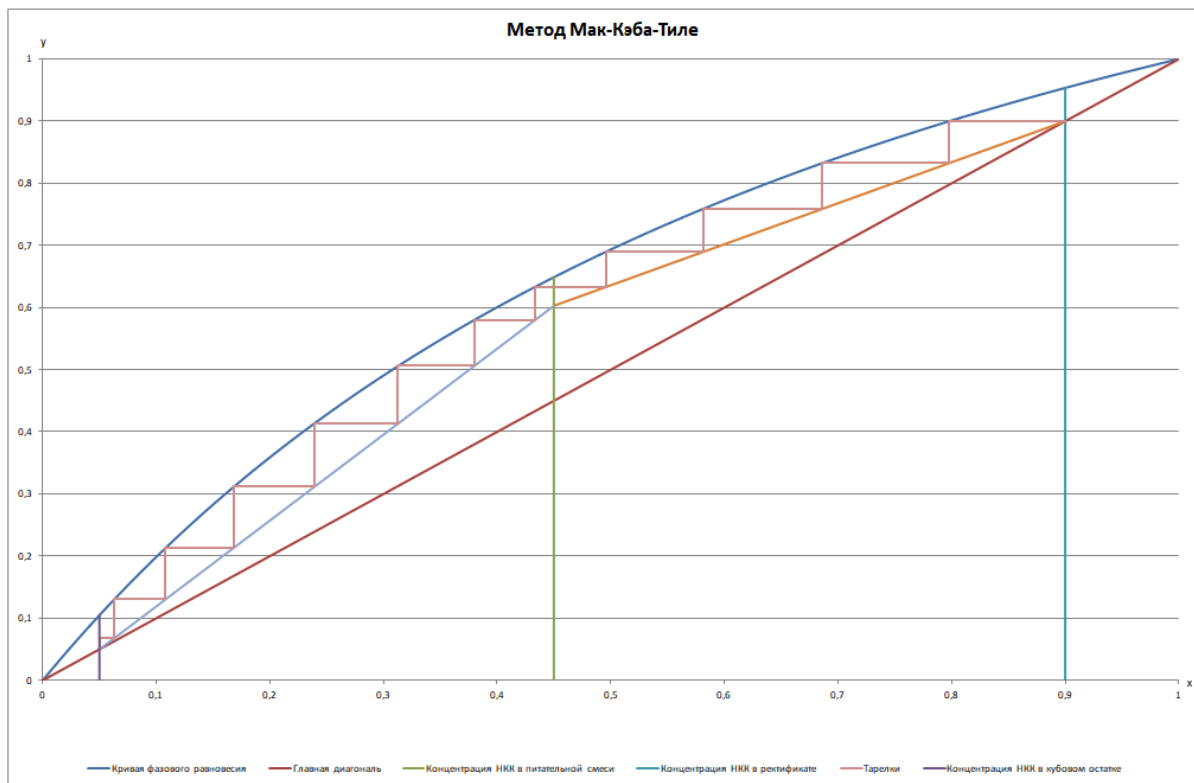


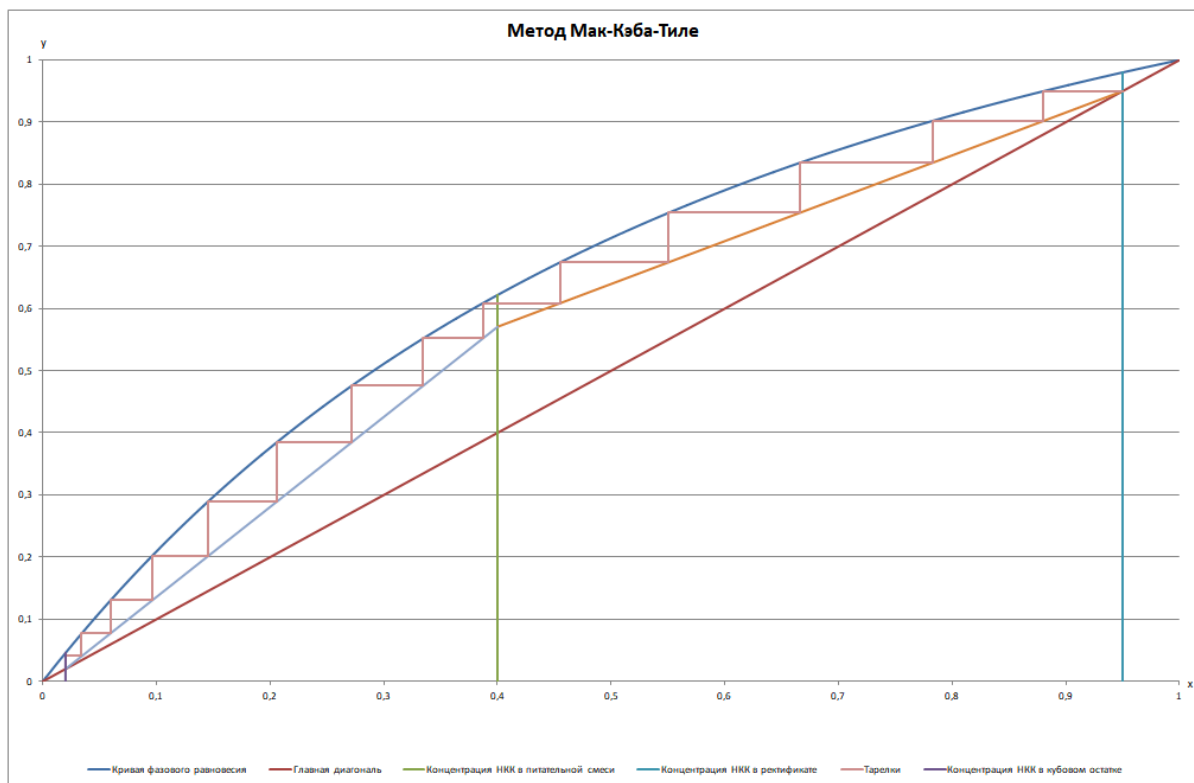
Рис. 5. Диаграмма t-x,y



На рис. 6 и 7 представлено определение числа тарелок методом Мак-Кэба-Тиле в х-у-диаграмме для смесей «этиловый спирт-вода» и «бензол-толуол» [3].



**Рис. 6. Определение теоретического числа тарелок методом Мак-Кэба-Тиле (смесь «этиловый спирт-вода»)**



**Рис. 7. Определение теоретического числа тарелок методом Мак-Кэба-Тиле (смесь «бензол-толуол»)**



В программе автоматически строятся главная диагональ, кривая фазового равновесия и отрезки, определяющие рабочую область.

Количество тарелок определяется методом «ступенек»: от линии концентрации НКК в дистилляте до линии концентрации НКК в питательной смеси – количество тарелок в верхней (сепарационной, укрепляющей) части колонны, от линии концентрации НКК в питательной смеси до линии концентрации НКК в кубовом остатке – количество тарелок в нижней (отгонной, исчерпывающей) части колонны. На пересечении одной из «ступенек» и линии концентрации НКК в питательной смеси определяется и сравнивается длина отрезков слева и справа от данной линии: если длина отрезка справа окажется больше, чем длина отрезка слева, тарелка будет отнесена в верхней части колонны. В противном случае тарелка будет отнесена к нижней части колонны [4].

Полученное на графике количество тарелок будет определено автоматически и внесено в таблицу. На рис. 8 (для смеси «этиловый спирт-вода») и рис. 9 (для смеси «бензол-толуол») представлено определенное графически теоретическое число тарелок.

Часть колонны	Метод Мак-Кэба-Тиле
Теоретическое число тарелок	
Верхняя	5
Нижняя	7

Рис. 8. Определенное число тарелок (смесь «этиловый спирт-вода»)

Часть колонны	Метод Мак-Кэба-Тиле
Теоретическое число тарелок	
Верхняя	6
Нижняя	8

Рис. 9. Определенное число тарелок (смесь «этиловый спирт-вода»)

## Выводы

В ходе выполнения данной научной работы с помощью средств MS Excel и VBA была создана программа для определения теоретического числа тарелок методом Мак-Кэба-Тиле. Данная программа позволит ускорить процесс конструирования ректификационных колонн как для обучающихся, так и специалистов в области проектирования данного теплообменного оборудования.

## Библиографический список

1. Захаров В.М., Смирнов Н.Н. Ректификационные установки: учеб. пос. / Изд. 2-е, перераб. и доп. – Иваново: ИГЭУ, 2017. – 388 с.
2. Бухмиров В.В. Теплообмен: учеб. пос. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – 360 с.
3. Кудрявцев Н.Г., Кудин Д.В., Беликова М.Ю. Программирование на VBA MS Excel: уч. пос. – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2015. – 116 с.
4. Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Шелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтепереработки и нефтехимии. – М.: Химия, 2000. – 677 с.

## Сведения об авторах

Смирнов Николай Николаевич, канд. техн. наук, доцент, ТЭ, ИГЭУ, SPIN-код: [5001-3261](https://orcid.org/5001-3261).  
Смирнов Дмитрий Александрович, студент магистратуры.

## Ссылки для цитирования

Смирнов Д.А. Программа для определения теоретического числа тарелок в атмосферной ректификационной колонне методом Мак-Кэба-Тиле // Энергетические системы. – 2025. – № 4. – С. 108-112.

Smirnov, D. (2025). A program for determining the theoretical number of plates in an atmospheric distillation column using McCabe-Thiele method. *Energy Systems*, 4, 108-112. <https://doi.org/10.34031/es.2025.4.13>

