

# Способы выражения концентраций

Название	Что показывает	Обозначение	
		$\Phi_x$	$\Phi_y$
Массовая доля	$\frac{\text{кг } A}{\text{кг } (A + B)}$	$\bar{x}$	$\bar{y}$
Молярная доля	$\frac{\text{кмоль } A}{\text{кмоль } (A + B)}$	$x$	$y$
Относительная массовая концентрация	$\frac{\text{кг } A}{\text{кг } B}$	$\bar{X}$	$\bar{Y}$
Относительная молярная концентрация	$\frac{\text{кмоль } A}{\text{кмоль } B}$	$X$	$Y$
Объёмная массовая концентрация	$\frac{\text{кг } A}{\text{м}^3 (A + B)}$	$\bar{C}_x$	$\bar{C}_y$
Объёмная молярная концентрация	$\frac{\text{кмоль } A}{\text{м}^3 (A + B)}$	$C_x$	$C_y$

# Уравнение массопередачи

$$M = K_x F \Delta x_{cp}$$

$$M = K_y F \Delta y_{cp}$$

Сравним

$$Q = KF \Delta t_{cp}$$

# Аналогия процессов тепло- и массопередачи

Теплообмен	Массообмен
Основное уравнение теплопередачи $Q = KF\Delta t_{cp}$	Уравнение массопередачи $M = K_x F \Delta x_{cp}; M = K_y F \Delta y_{cp}$
$Q, Вт = \frac{Дж}{с}$ , находится из уравнения теплового баланса	$M$ , кг/с, находится из уравнения материального баланса
$\Delta t_{cp}$ – средняя разность температур, движущая сила процесса	$\Delta x_{cp}, \Delta y_{cp}$ – средние разности концентраций, движущие силы переноса массы
$K$ – коэффициент теплопередачи, характеризует интенсивность протекания процесса. Характеризует <i>кинетику</i> процесса.	$K_x$ и $K_y$ – коэффициенты массопередачи, характеризуют интенсивность переноса вещества. Тоже характеризует <i>кинетику</i> процесса.
$F$ – поверхность теплопередачи, м <sup>2</sup> , величина понятная и осязаемая	$F$ – поверхность контакта фаз, величина не очень понятная и неосязаемая
Процесс теплопередачи складывается из двух стадий, двух процессов теплоотдачи. Потоки разделены стенкой.	Процесс массопереноса также складывается из двух процессов массоотдачи: от ядра $\Phi_y$ к её границе и от границы в ядро $\Phi_x$ (если говорим про абсорбцию)

# Материальный баланс процессов массопередачи

## Уравнение рабочей линии

Рассмотрим в качестве примера  
процесс абсорбции

$G, Y_K$

$L, X_H$

$G, Y_H$

$L, X_K$

Материальный баланс: вход целевого компонента равен его выходу

$$GY_{\text{Н}} + LX_{\text{Н}} = GY_{\text{К}} + LX_{\text{К}}$$

Тогда

$$M = G(Y_{\text{Н}} - Y_{\text{К}}) = L(X_{\text{К}} - X_{\text{Н}}).$$

Это и есть уравнение материального баланса процесса абсорбции

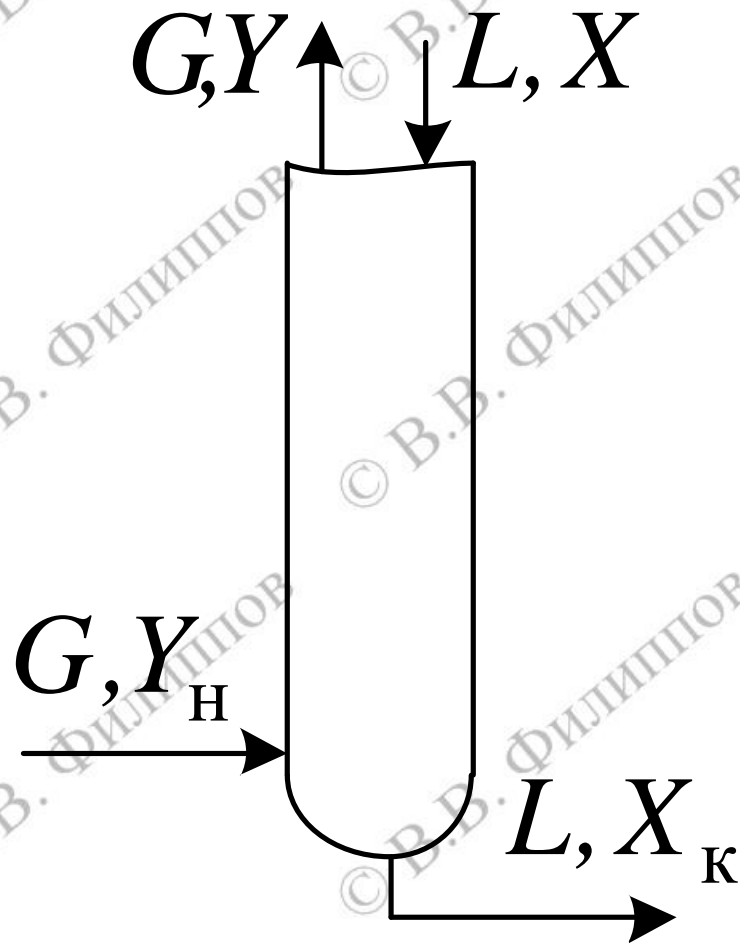
# Уравнение рабочей линии

Рабочая линия связывает концентрации компонента в фазах, между которыми он перемещается. Т.е. надо установить связь

$$Y = f(X)$$

Составим материальный баланс произвольного сечения абсорбера





$$GY_H + LX = GY + LX_K$$

Отсюда получаем

$$G(Y_H - Y) = L(X_K - X)$$

Выразим зависимость  $Y$  от  $X$ , получим

$$Y = \frac{GY_H - LX_K + LX}{G} = \frac{L}{G}X + Y_H - \frac{L}{G}X_K$$

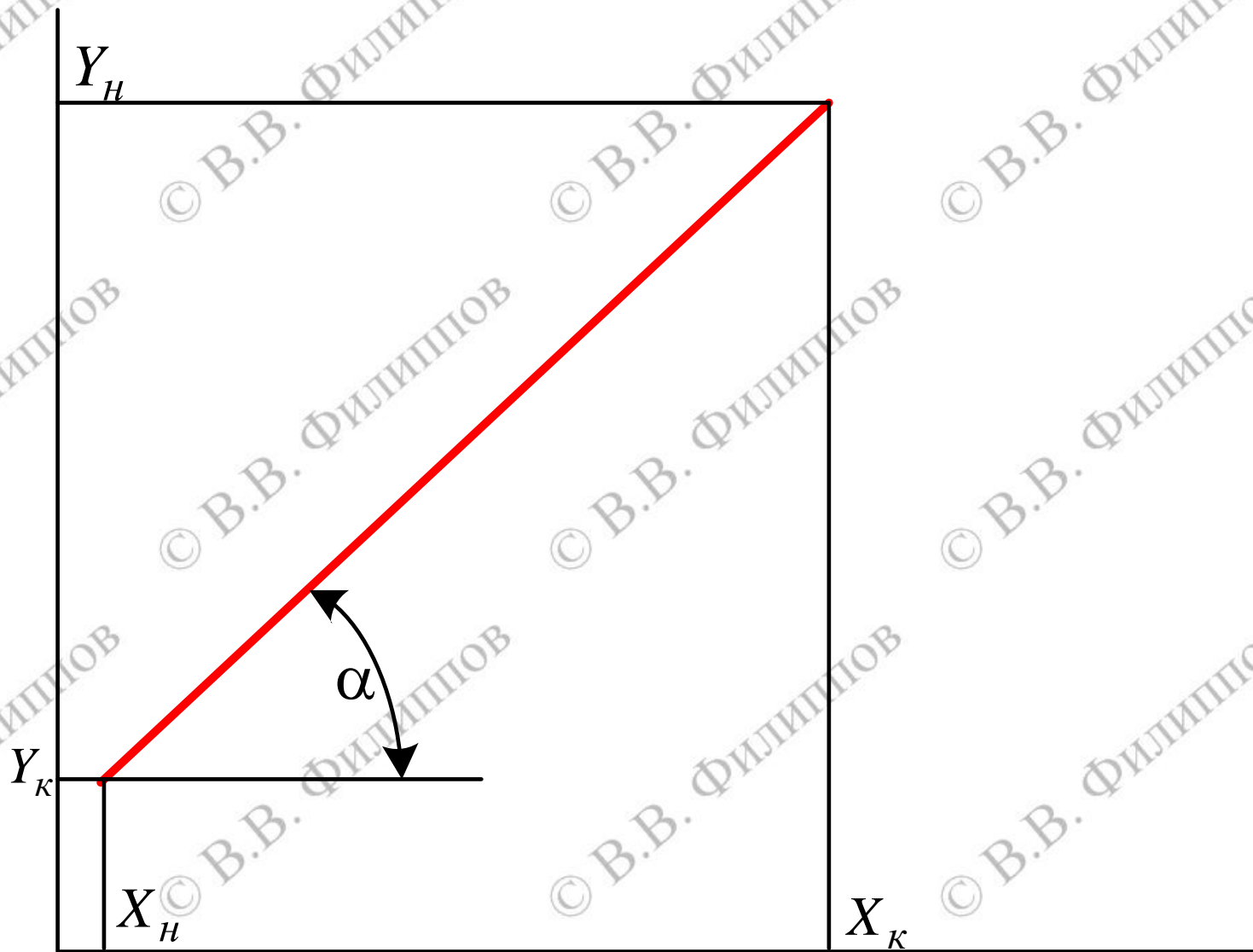
Это и есть уравнение рабочей линии процесса абсорбции. С точки зрения линейной алгебры, это уравнение вида

$$y = Ax + B$$

$$A = \frac{L}{G} = \operatorname{tg} \alpha$$

$$B = Y_H - \frac{L}{G}X_K$$

Содержание целевого компонента в газовой фазе,  $Y$

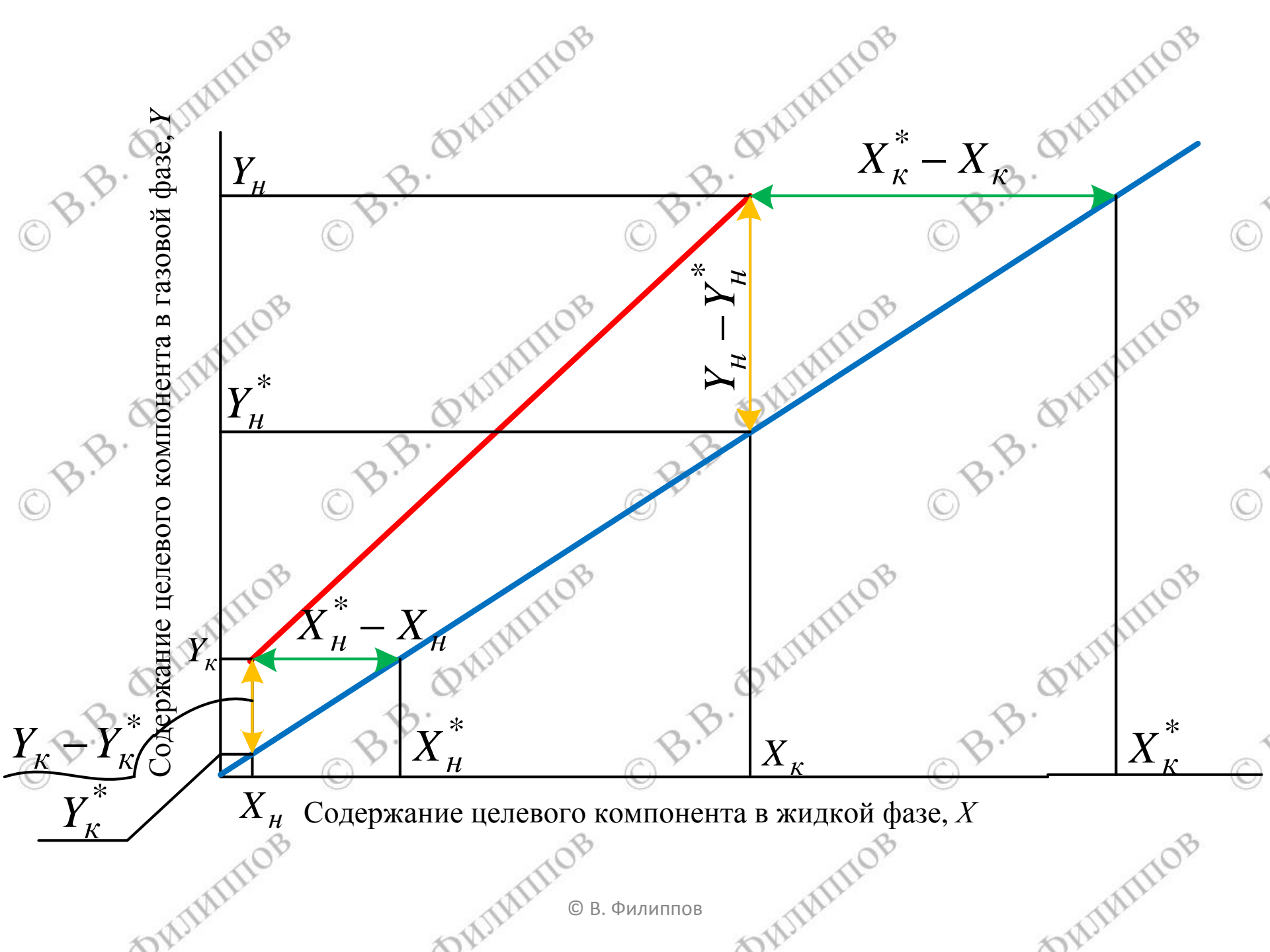


Содержание целевого компонента в жидкой фазе,  $X$

# Способы выражения движущей силы процесса массопередачи

Способ выражения зависит от того, является ли линия равновесия прямой. Или она прямолинейна.

Сначала рассмотрим простой случай – линия равновесия прямая.



Расчёт движущей силы проводится по формулам

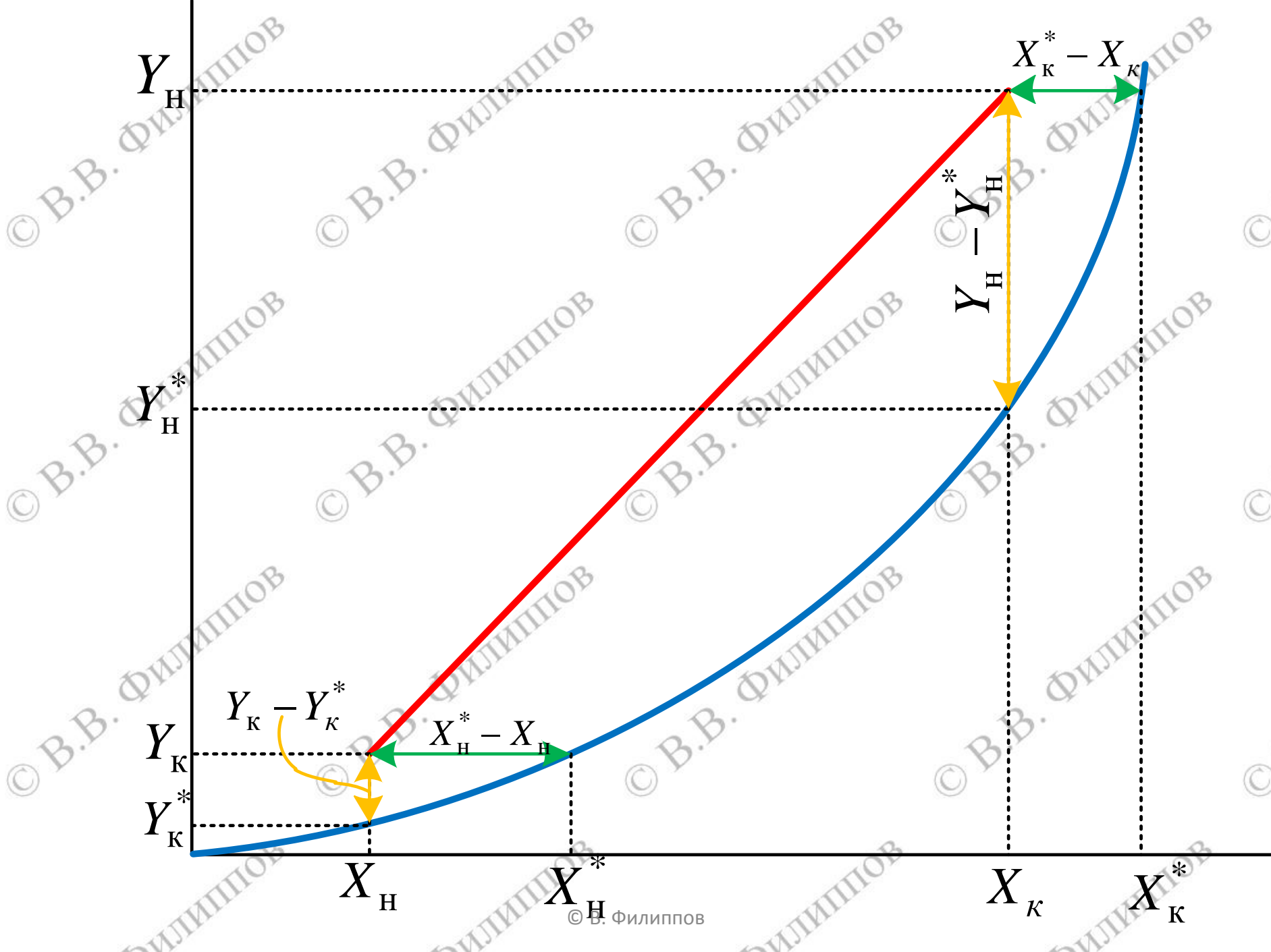
$$\Delta Y_{cp} = \frac{(Y_H - Y_H^*) - (Y_K - Y_K^*)}{\ln \frac{Y_H - Y_H^*}{Y_K - Y_K^*}}$$

$$\Delta X_{cp} = \frac{(X_K^* - X_K) - (X_H^* - X_H)}{\ln \frac{X_K^* - X_K}{X_H^* - X_H}}$$

# **Линия равновесия криволинейна.**

**В этом случае расчёт усложнится**





Теперь движущая сила по высоте колонны будет сначала увеличиваться, потом уменьшаться.

Для расчёта движущей силы в этом случае можно использовать понятие «**число единиц переноса**» (ЧЕП). Обозначается  $n_y$  для газовой фазы и  $n_x$  для жидкой.

$$\Delta Y_{cp} = \frac{Y_H - Y_K}{n_y}$$

$$\Delta X_{cp} = \frac{X_K - X_H}{n_x}$$

где

$$n_y \equiv \int_{Y_k}^{Y_H} \frac{dY}{Y - Y^*}$$

число единиц переноса по  
газовой фазе

$$n_x \equiv \int_{X_H}^{X_k} \frac{dX}{X^* - X}$$

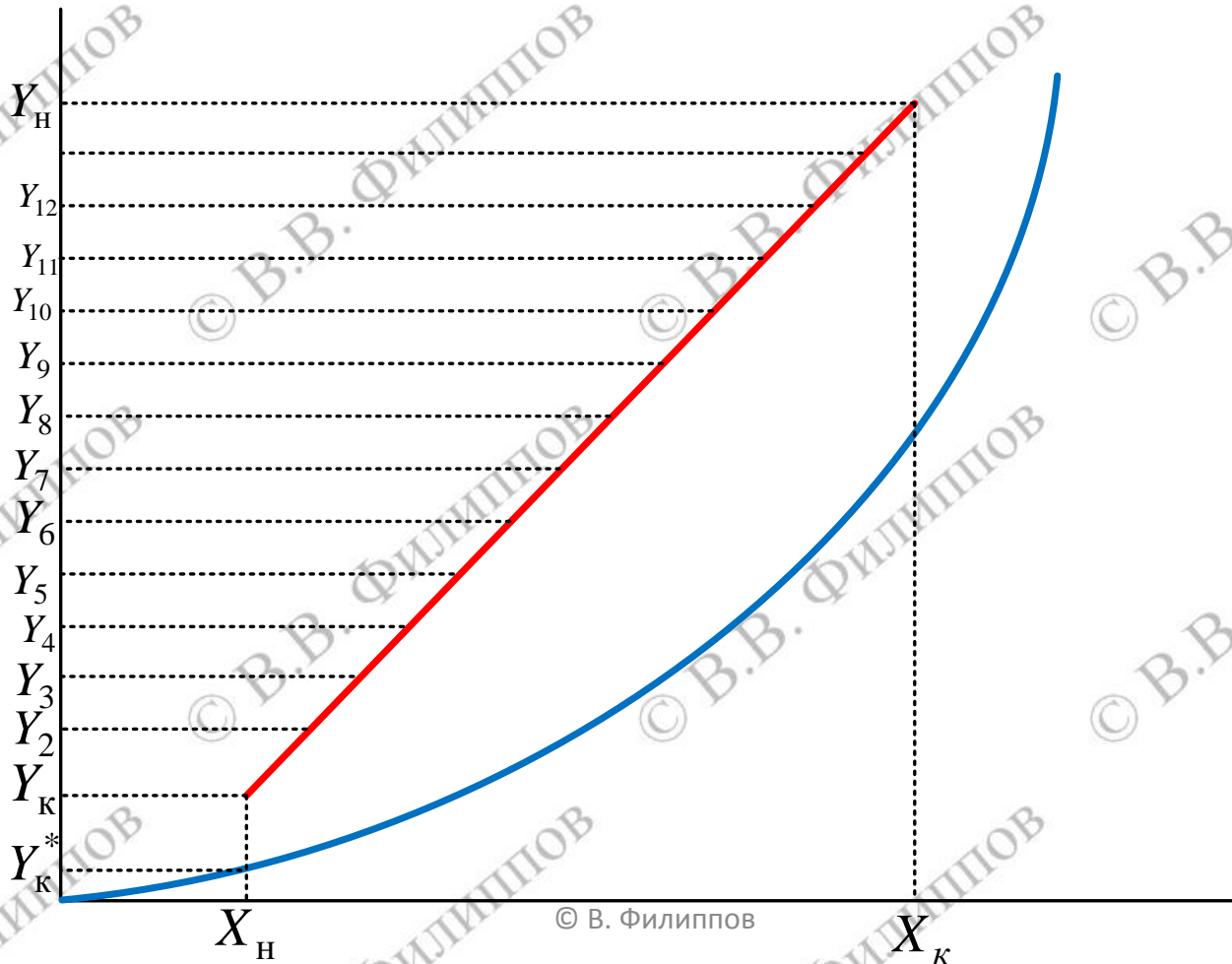
число единиц переноса по  
жидкой фазе

**Значения этих интегралов можно найти  
графическим методом**

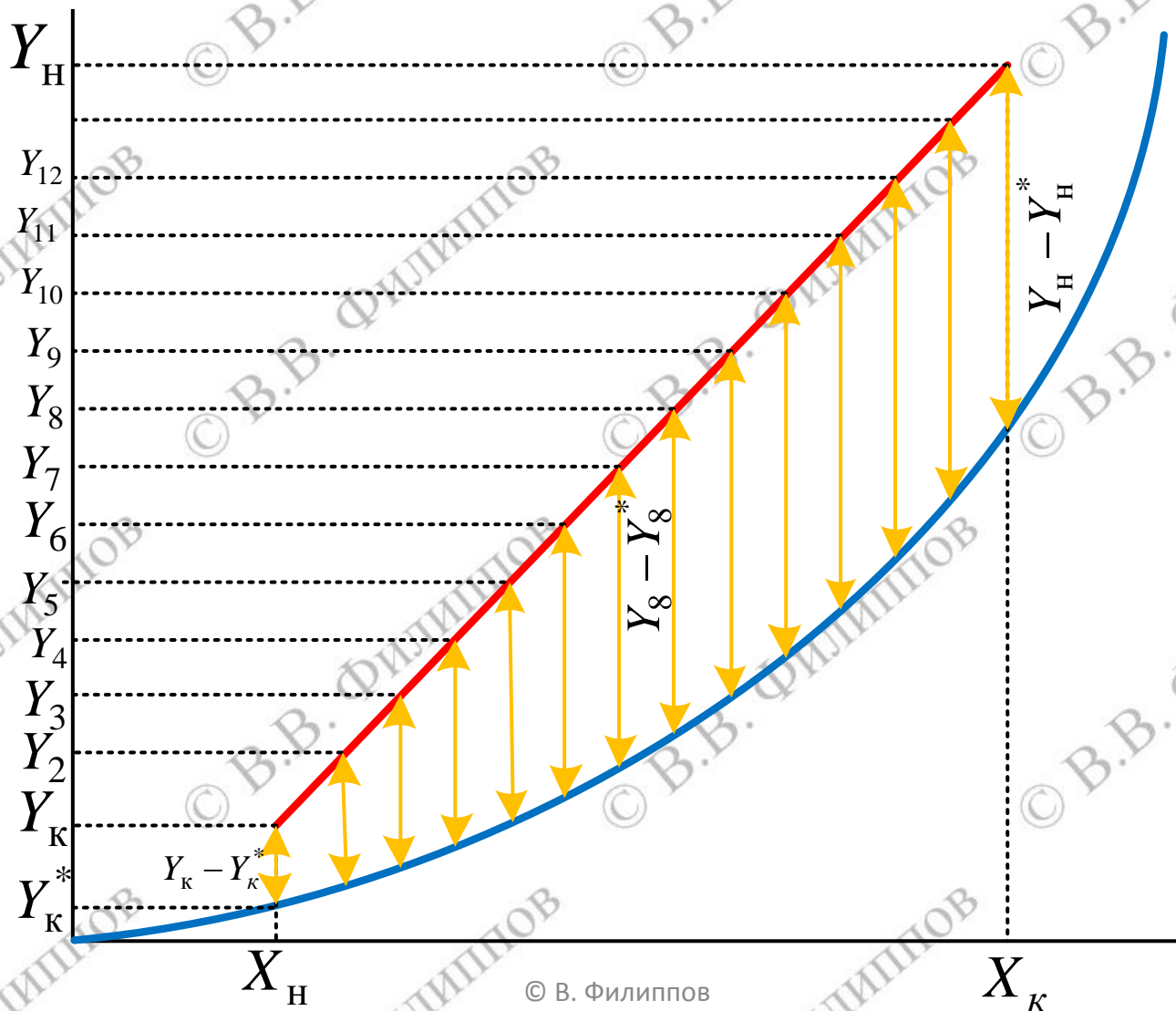
# Метод графического расчёта числа единиц переноса

# Алгоритм вычисления $n_y$ (или $n_x$ )

1. Разбиваем участок от  $Y_k$  до  $Y_n$  на возможно большее число отрезков.



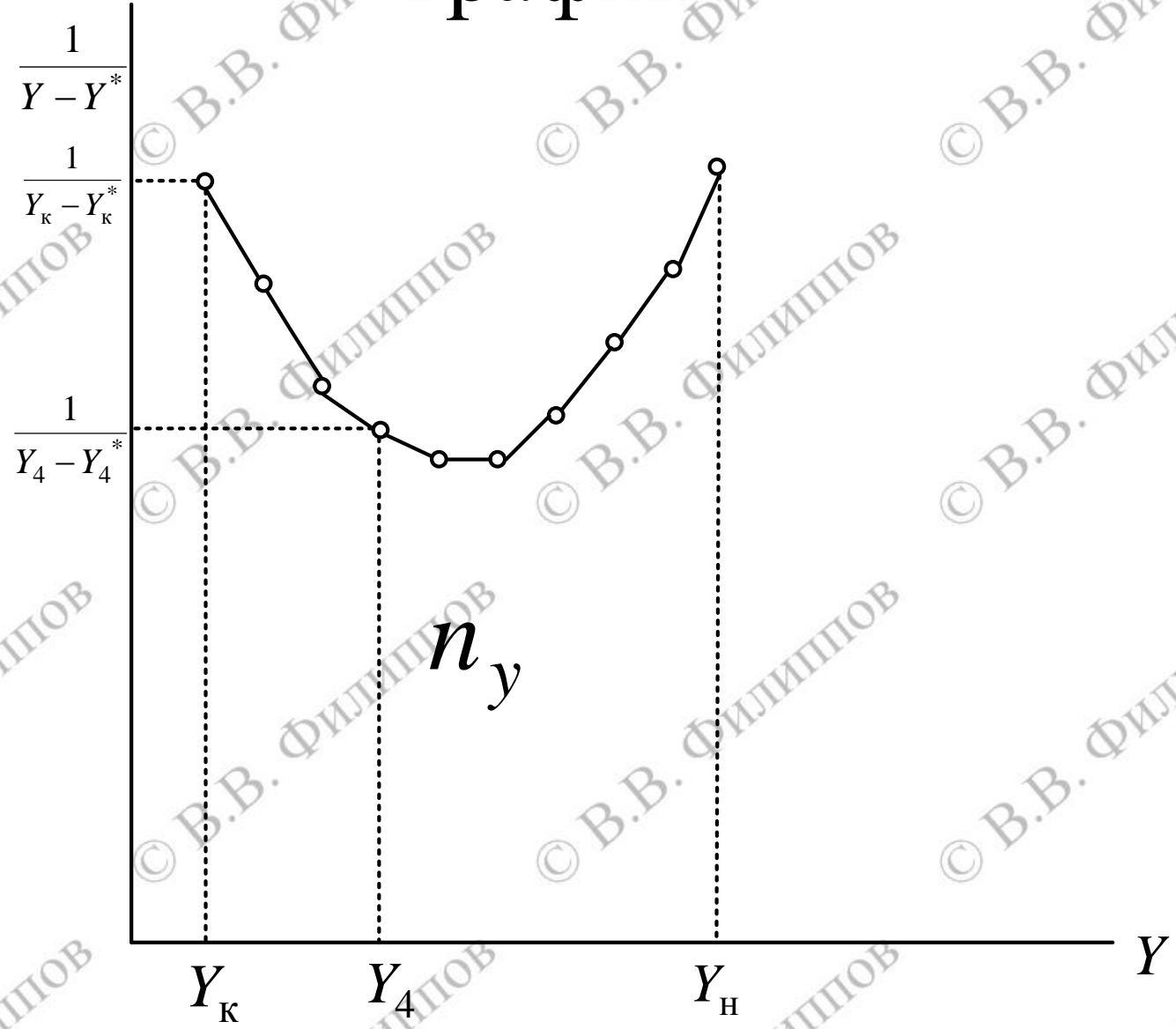
## 2. Вычисляем разности между рабочей и равновесной концентрациями



### 3. Начинаем заполнять таблицу

№	Значение рабочей концентрации	Разность между рабочей и равновесной концентрацией $Y_i - Y_i^*$	Значение дроби $\frac{1}{Y_i - Y_i^*}$
1	$Y_K$	$Y_K - Y_K^*$	$\frac{1}{Y_K - Y_K^*}$
2	$Y_2$	$Y_2 - Y_2^*$	$\frac{1}{Y_2 - Y_2^*}$
3	$Y_3$	$Y_3 - Y_3^*$	$\frac{1}{Y_3 - Y_3^*}$
14	$Y_H$	$Y_H - Y_H^*$	$\frac{1}{Y_H - Y_H^*}$

# 4. По данным таблицы строим график





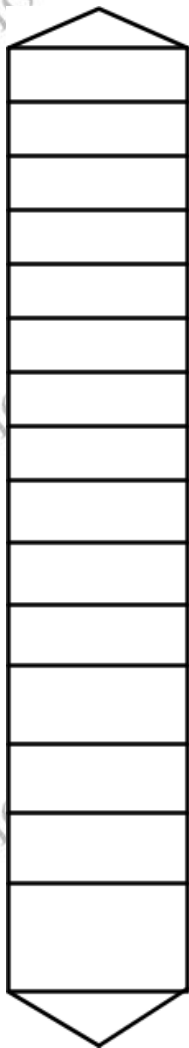
Значение  $n_y$  равно площади подынтегральной кривой. Её можно найти, например, путём взвешивания, вырезав получившуюся фигуру и эталон.

Мы рассмотрели первый способ выражения движущей силы процесса массопередачи – через среднюю разность концентраций по газовой и жидкой фазам  $\Delta Y_{cp}$   $\Delta X_{cp}$

Но есть и другие способы. Выбор того или иного способа зависит от того, как будет организован контакт фаз в аппарате. А этот контакт можно организовать двумя способами: непрерывно и ступенчато.

Непрерывный контакт фаз происходит в  
**насадочных колоннах.**

Ступенчатый контакт фаз происходит в  
**тарельчатых колоннах.**



Тарельчатая колонна, работающая под избыточным давлением



Насадочная колонна, работающая под атмосферным давлением

# Различные типы насадок



# Наиболее часто применяются тарельчатые аппараты

Для аппаратов со ступенчатым контактом фаз  
вводится понятие **теоретической тарелки**.

**Теоретической тарелкой называется такое гипотетическое устройство, на котором между фазами достигается состояние равновесия.**

**Знать!**

Можно сказать иначе: теоретическая тарелка – это самое лучшее контактное устройство. Она так хорошо перемешивает фазы, что они приходят в состояние равновесия. Но мы знаем, что на практике равновесие никогда не достигается.

Равновесие — это вечный покой. Поэтому теоретическая тарелка — это недостижимая мечта. Но использование этого параметра очень помогает для оценки величины движущей силы.

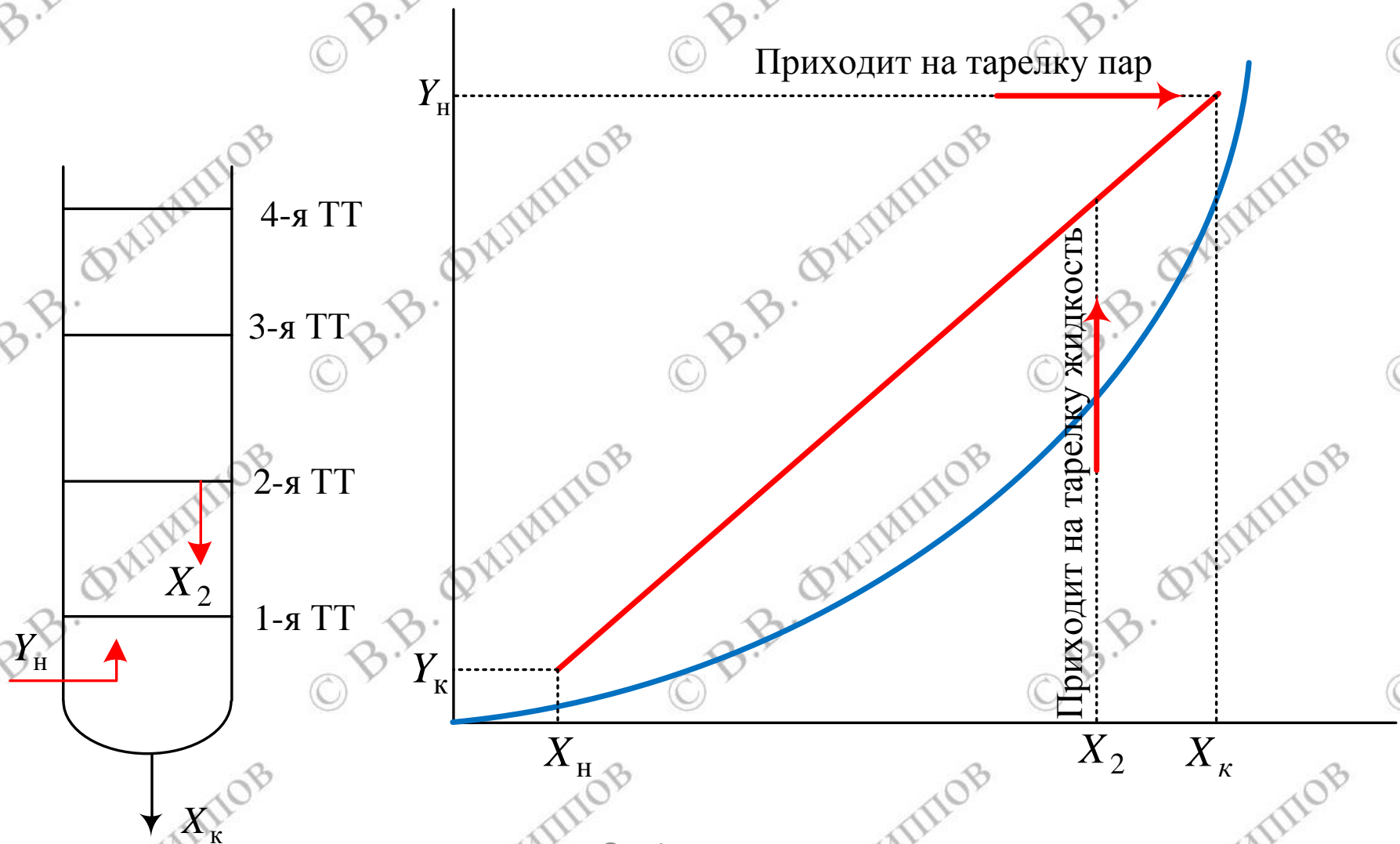
**Рассмотрим определение ТТ на графике.**

**Знать!**



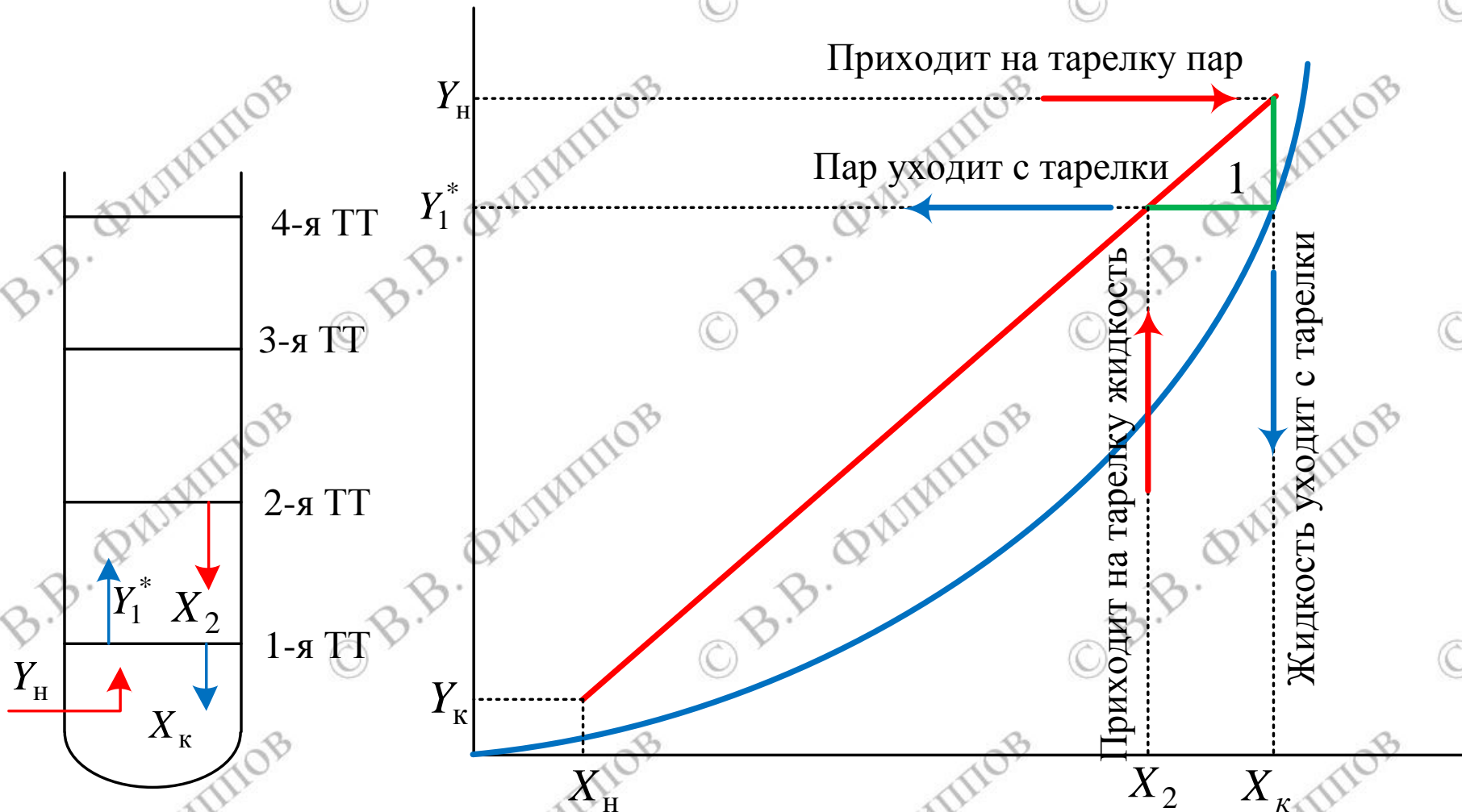
# Графическое нахождение числа ТТ

Потоки приходят на первую тарелку

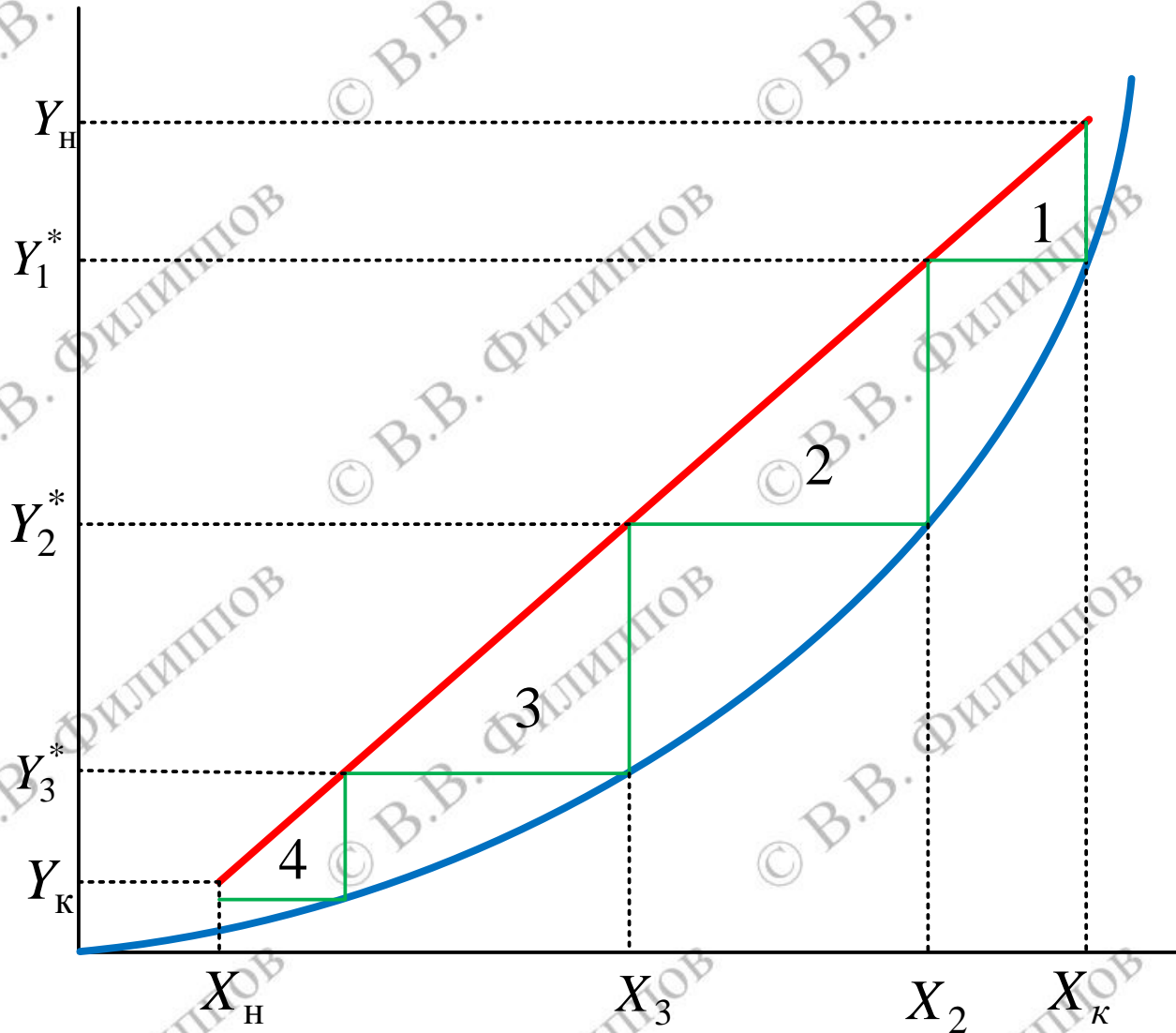
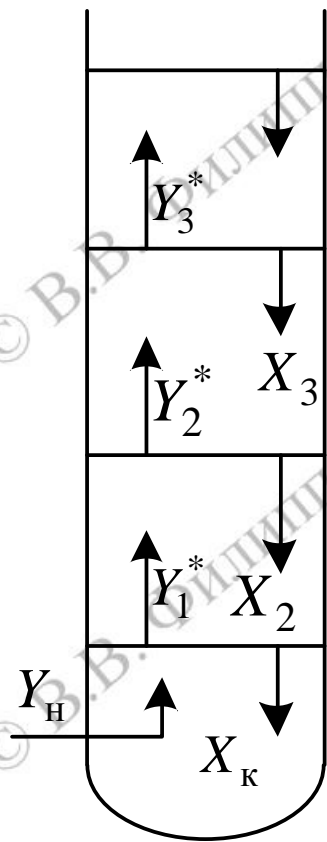


# Первая теоретическая тарелка.

Её покидают равновесные газ и жидкость

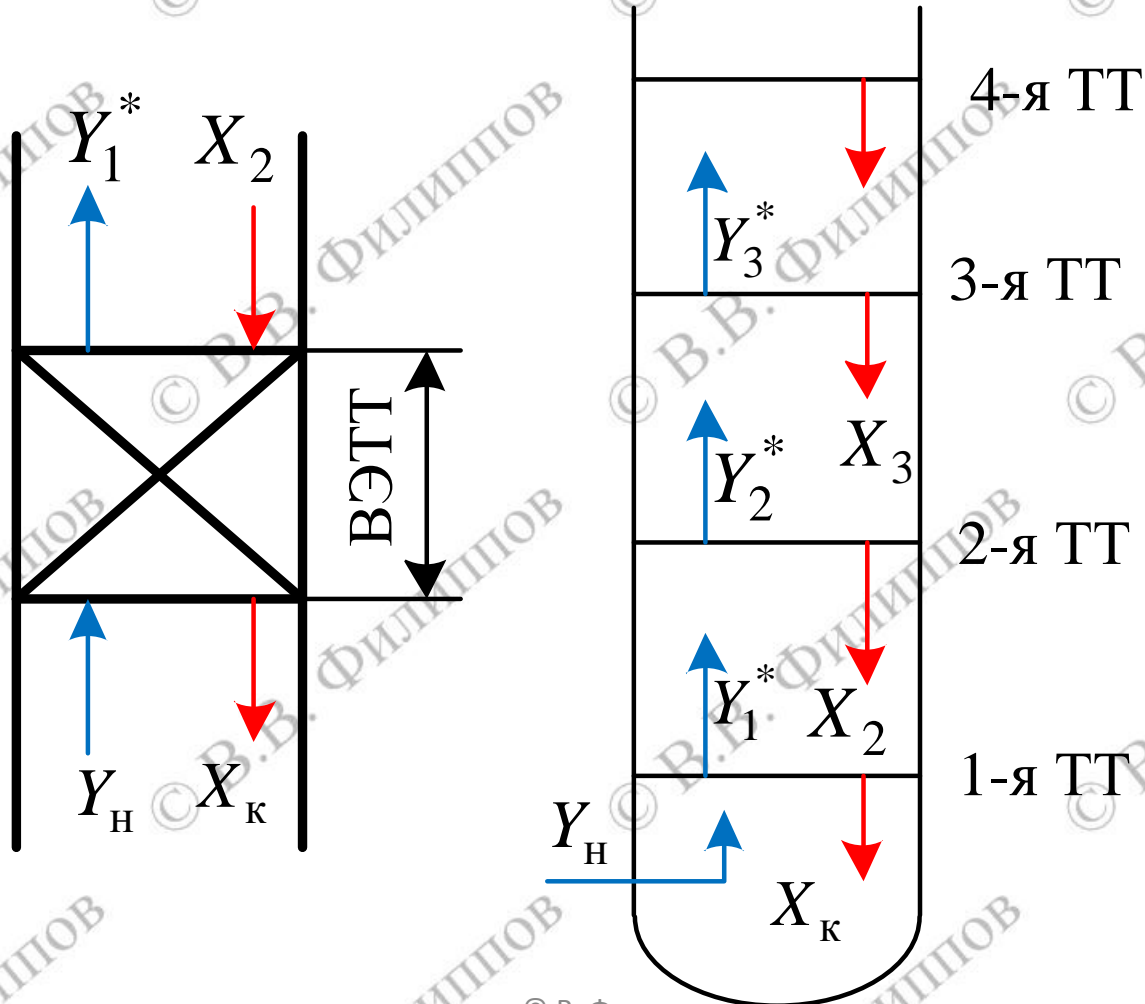


# Графическое нахождение числа ТТ



Таким образом, число теоретических тарелок, которое необходимо для проведения процесса, находится путём вписывания ступеней между рабочей и равновесной линиями.

Для разделяющей способности насадочных колонн вводится понятие высоты слоя насадки, эквивалентной теоретической тарелке (ВЭТТ).



Таким образом, ВЭТТ – это высота слоя насадки, которая обладает таким же разделяющим действием, как теоретическая тарелка.

ВЭТТ очень удобно использовать для характеристики движущей силы, если предполагается использовать насадочную колонну.