

Тепловая нагрузка на теплообменник Q и её расчёт

В исходных данных на проектирование теплообменника обязательно должны быть указаны следующие величины:

1. расход хотя бы одного из потоков (горячего или холодного) и его состав;
2. начальная и конечная температуры потока, для которого указан расход;
3. состав второго потока;
4. хотя бы одна температура второго потока (не обязательно – можем принять сами).

Для нахождения тепловой нагрузки Q

используются уравнения тепловых

балансов, т.е. закон сохранения энергии. Но

перед тем, как приступить к выводу этих

уравнений, нам нужно ввести ещё два

свойства — удельную теплоёмкость c и

удельную теплоту испарения (конденсации) r .

Их размерности $c, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ $r, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$

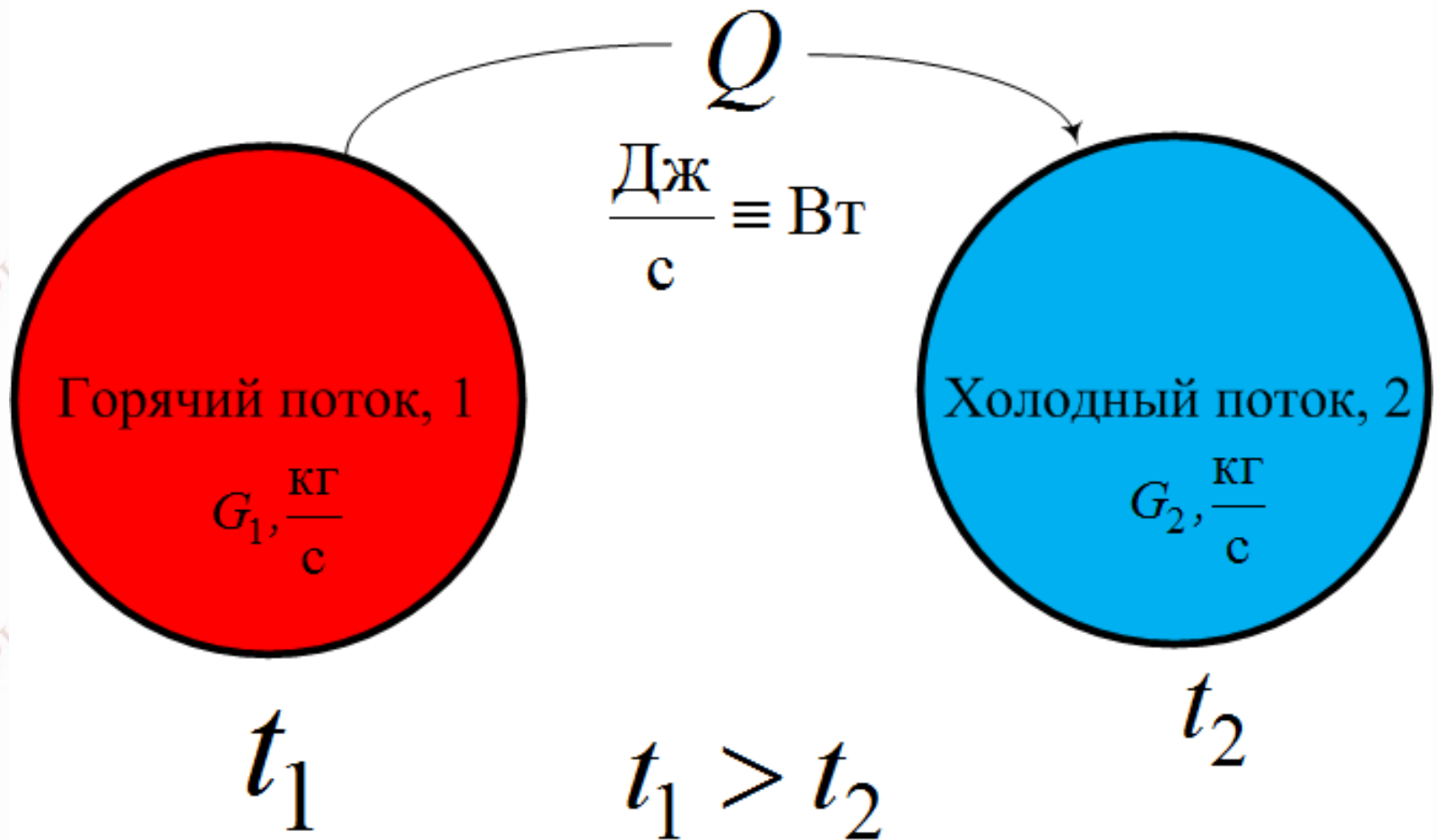
В нефтепереработке вместо удельной теплоёмкости и теплоты испарения принято использовать удельную энтальпию

$$h_{\text{ж}} = c_{\text{ж}} \cdot t, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

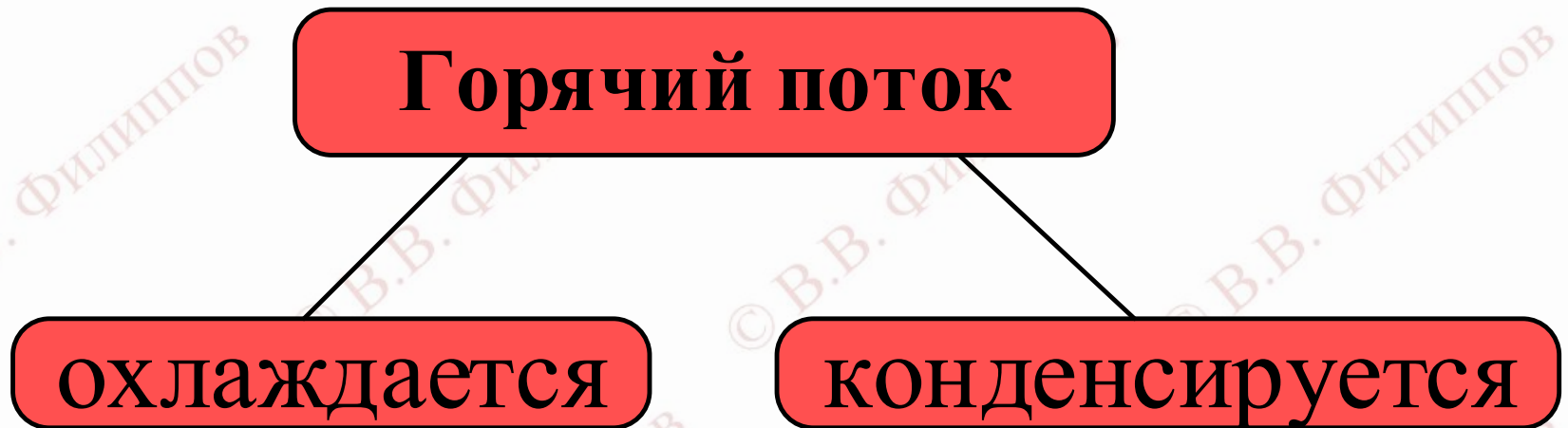
$$H_{\text{п}} = c_{\text{п}} \cdot t, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$H_{\text{п}} - h_{\text{ж}} = r, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

И снова схема передачи теплоты



Итак, горячий поток отдаёт теплоту. Что с ним может происходить?



Кристаллизацию мы здесь не рассматриваем!

Холодный поток получает теплоту. Вот что с ним происходит

Холодный поток

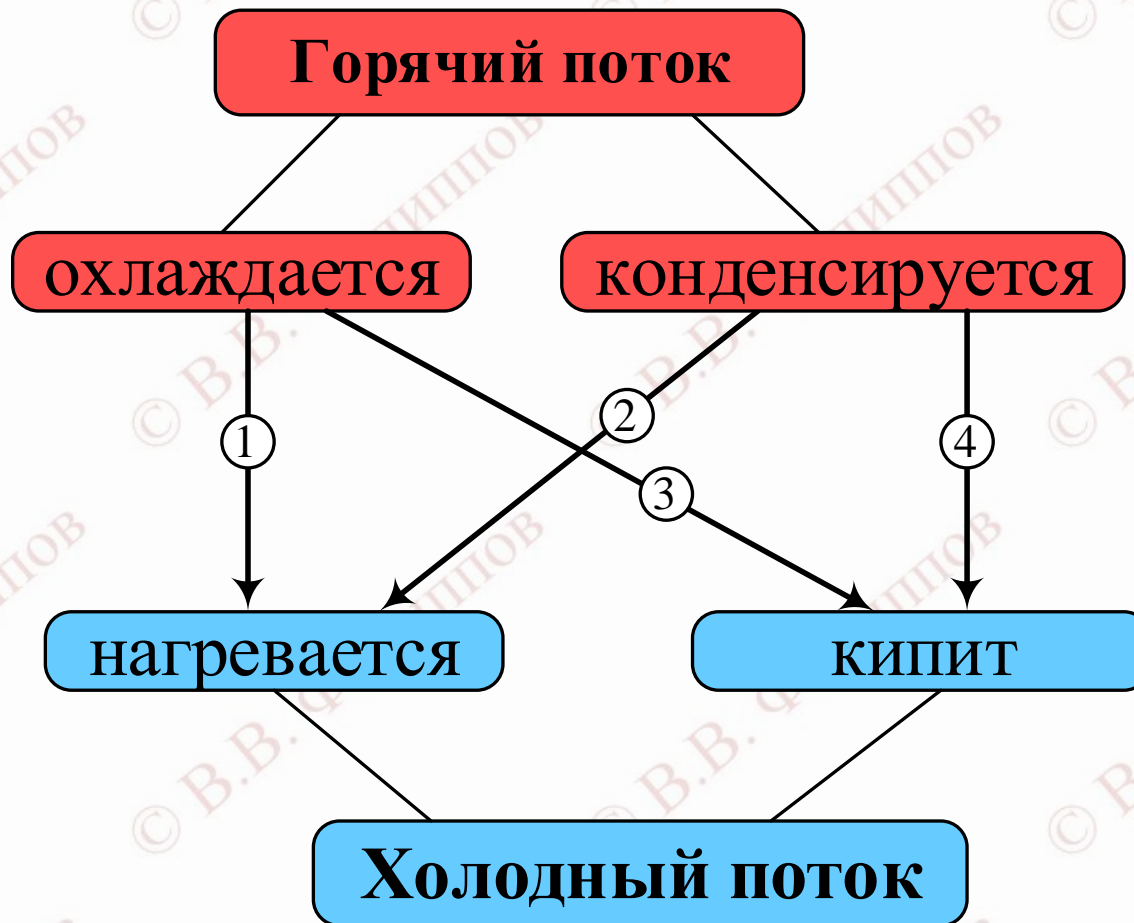
```
graph TD; A[Холодный поток] --> B[нагревается]; A --> C[кипит];
```

нагревается

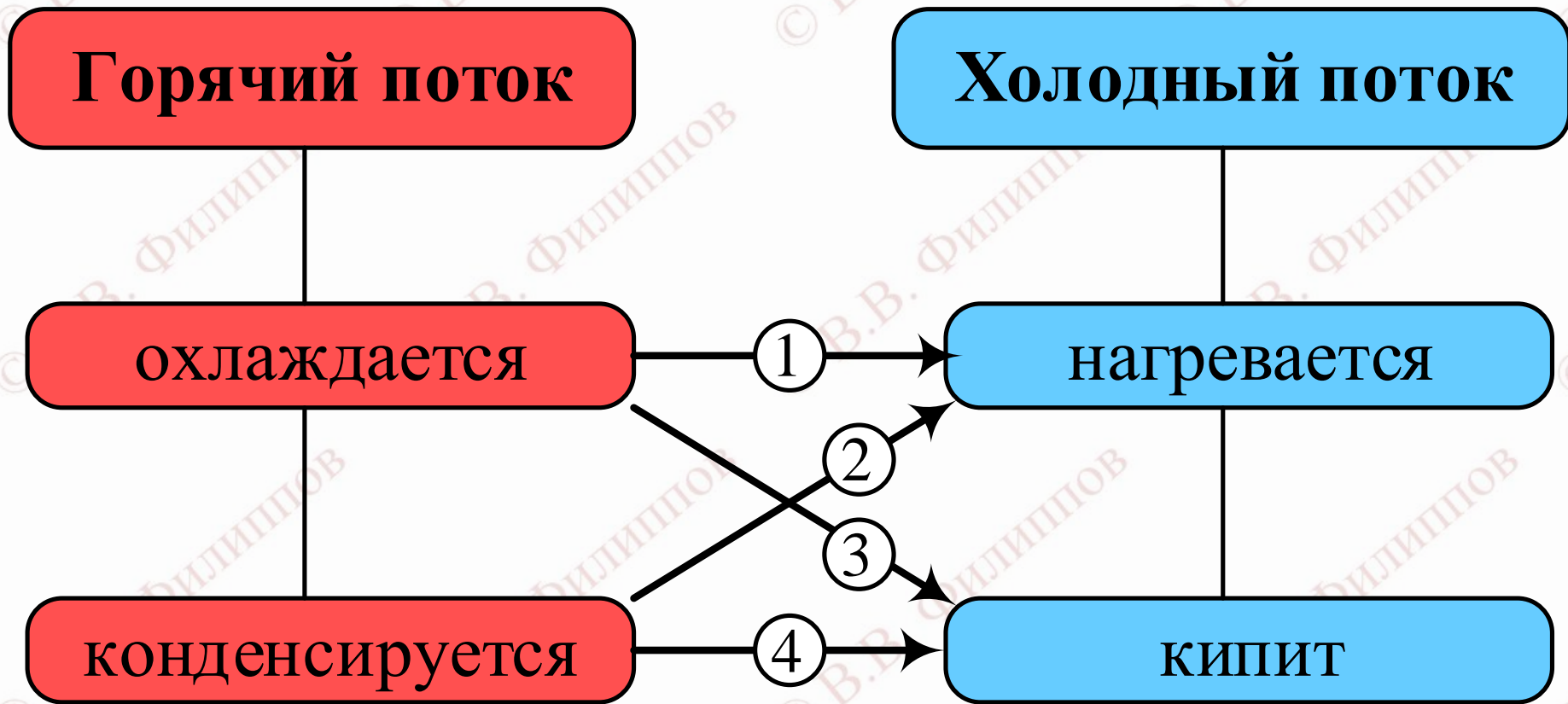
КИПИТ

Плавление мы здесь не рассматриваем!

В результате может протекать всего **ЧЕТЫРЕ** процесса



На прошлой лекции эту схему я показал чуть иначе

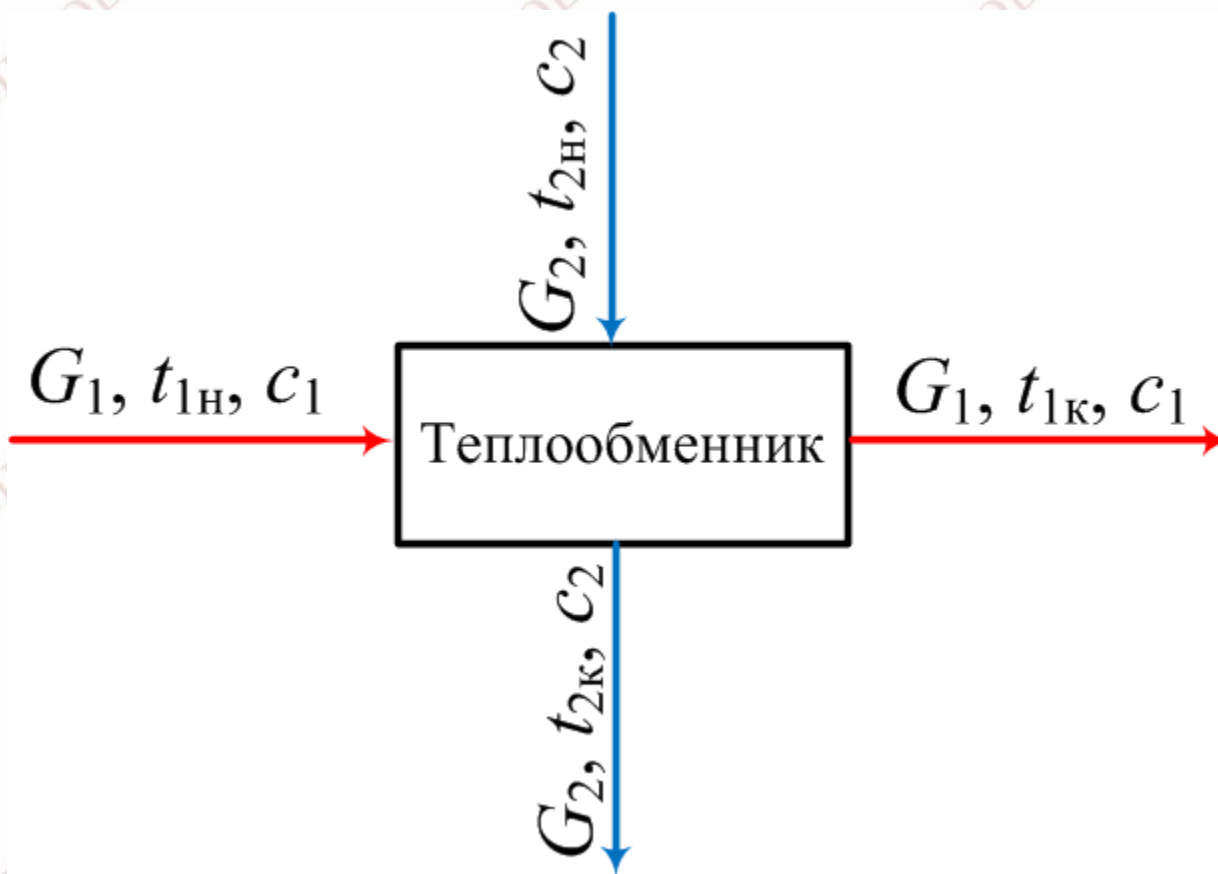


Для каждого из этих случаев будет своё уравнение теплового баланса. Т.е. всего мы получим четыре уравнения теплового баланса, знать которые обязательно.

Уравнения будут получены без учёта потерь теплоты (или холода) в окружающую среду!

1. Горячий поток охлаждается, холодный нагревается

Принцип составления теплового баланса



Вход теплоты:

С горячим потоком $G_1 c_1 t_{1н}$;

С холодным потоком: $G_2 c_2 t_{2н}$;

Выход теплоты:

С горячим потоком $G_1 c_1 t_{1к}$;

С холодным потоком $G_2 c_2 t_{2к}$;

Вход теплоты равен её расходу:

$$G_1 c_1 t_{1н} + G_2 c_2 t_{2н} = G_1 c_1 t_{1к} + G_2 c_2 t_{2к}$$

Это и есть тепловой баланс. Из него получаем уравнение для нахождения тепловой нагрузки

$$Q = G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н})$$

Ещё раз обозначения:

G_1 и G_2 – расходы горячего (1) и холодного (2) потоков, кг/с;

$t_{1н}$ и $t_{1к}$ – начальная и конечная температуры горячего потока;

$t_{2н}$ и $t_{2к}$ – начальная и конечная температуры холодного потока;

c_1 и c_2 – удельные теплоёмкости горячего и холодного потоков при их средних температурах.

В нефтепереработке используются энтальпии!

Из этого уравнения находится не только тепловая нагрузка Q , но и другие величины. Например, нужно охладить водой горячий поток. Сколько надо воды? Ответ найдём из первого уравнения

$$G_2 = \frac{Q}{c_2(t_{2к} - t_{2н})}$$

2. Горячий поток конденсируется, холодный нагревается

Для этого случая уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$Q = G_1 r_1 = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н})$$

где r_1 – удельная теплота конденсации пара горячего потока, в систем СИ Дж/кг.

3. Горячий поток охлаждается, ХОЛОДНЫЙ КИПИТ

Для этого случая уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$Q = G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 r_2$$

где r_2 – удельная теплота конденсации пара холодного потока, в систем СИ Дж/кг.

4. Горячий поток конденсируется, ХОЛОДНЫЙ КИПИТ

Для этого случая уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$Q = G_1 r_1 = G_2 r_2$$

Эти четыре уравнения знать!

End.

Определение средней разности температур

$$\Delta t_{\text{ср}}$$

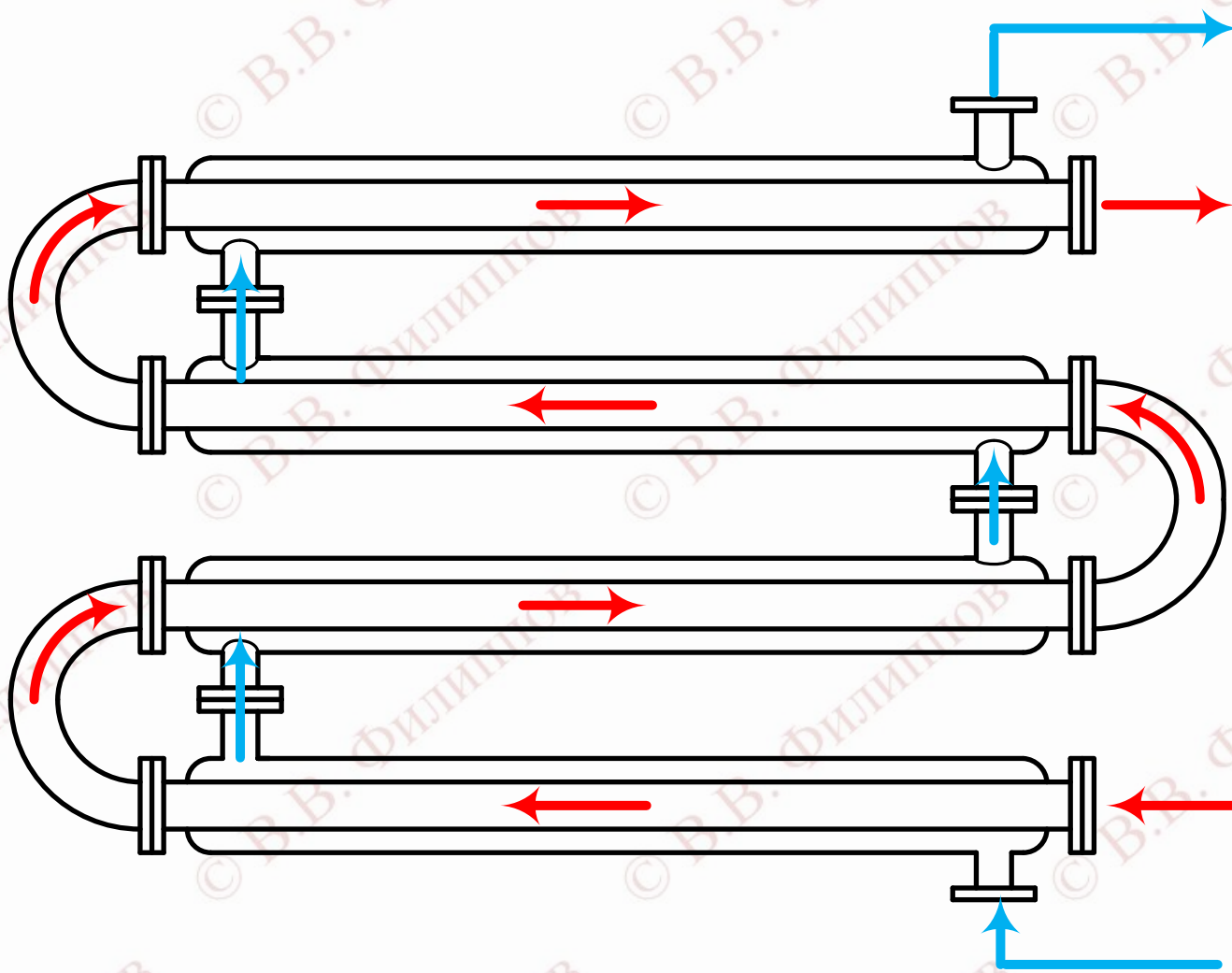
Температуры горячего и холодного потоков в ходе процесса теплопередачи могут меняться, а могут оставаться постоянными.

Если изменения агрегатного состояния вещества потока не происходит, то температура меняется – повышается для холодного потока или понижается для горячего.

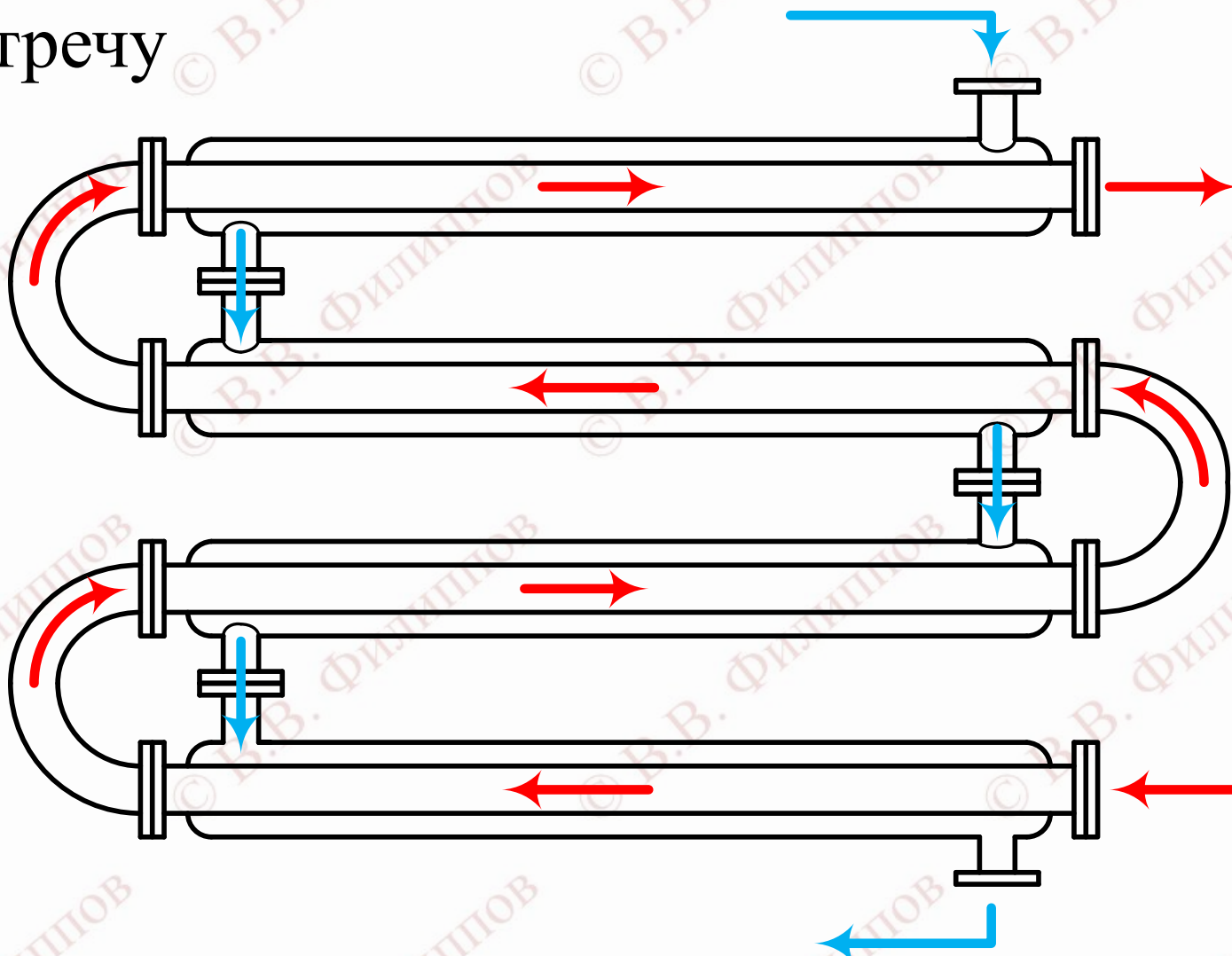
Если же процесс сопровождается изменением агрегатного состояния (вещество кипит или конденсируется), то температура не меняется или меняется незначительно (для смесей).

Кроме того, потоки можно направить так, что они будут двигаться вдоль разделяющей их стенки в одном направлении — такой *способ организации теплообмена* (запомним этот термин!) называется **прямоток**.

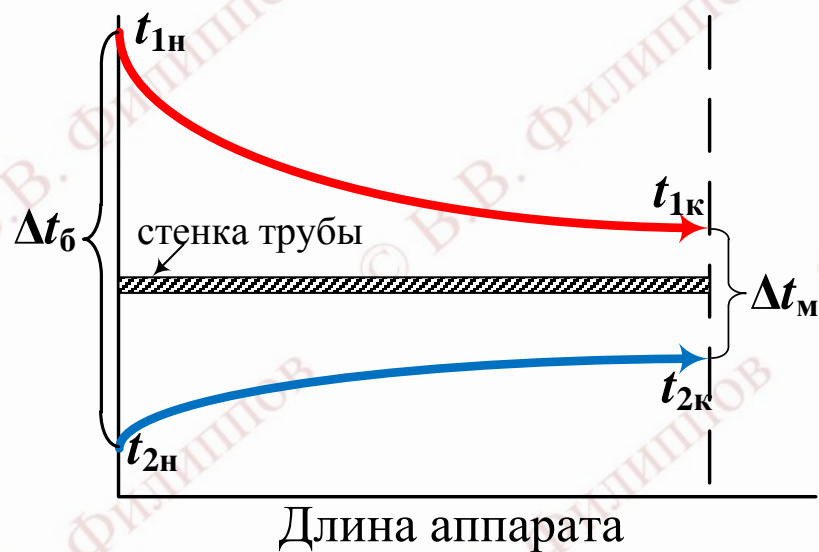
Вот прямоток – потоки параллельно



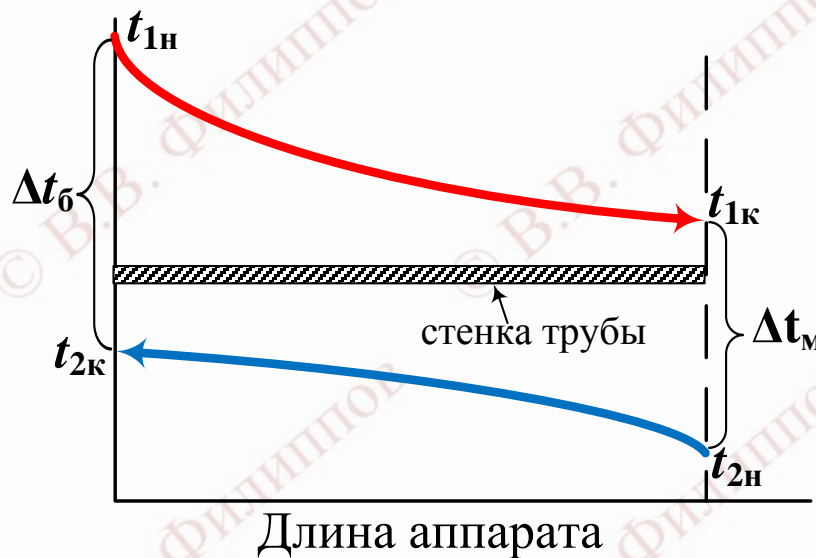
А вот противоток — потоки движутся
навстречу



А ВОТ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ВДОЛЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ



Прямоток



Противоток

На концах аппарата в обоих случаях появляется две разности температур: одна имеет большее значение, её так и называют – бóльшая разность и обозначают Δt_{σ} , а вторая – меньшая, её обозначают $\Delta t_{\text{м}}$.

Если бы температуры потоков менялись линейно, по прямой, то расчёт средней разности температур не представлял бы сложности — достаточно было бы найти среднее арифметическое значение между большей и меньшей разностями.

Но температуры меняются нелинейно.

Поэтому для расчётов используют более сложную формулу

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}$$

Знать!

Можно доказать, что если температуры
обоих потоков меняются, то противоток
даёт **большее значение средней**
разности температур по сравнению с
прямотоком.

А так как в формуле

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{ср}}}$$

значение средней разности температур
стоит в знаменателе, то, следовательно,
организация противотока уменьшит
стоимость аппарата.

Но если температура хотя бы одного потока остаётся постоянной или меняется незначительно (конденсация, кипение), то значения средней разности температур для прямотока и противотока получаются одинаковыми.

На практике «чистый» прямоток и «чистый» противоток встречаются довольно редко.

Например, в двух- и более ходовых теплообменниках без перегородок в межтрубном пространстве способ организации теплообмена получил название **смешанный ток**.

А в теплообменниках с перегородками в межтрубном пространстве – перекрёстный ток. Понятно, что движущая сила для этих способов будет больше, чем для «чистого» прямотока, но меньше, чем для «чистого» противотока.

1) ПРЯМОТОК



2) ПРОТИВОТОК



3) ПЕРЕКРЕСТНЫЙ ТОК



4) СМЕШАННЫЕ ТОКИ

4.1



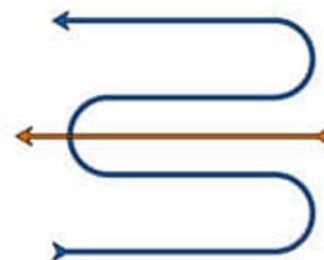
ГОРЯЧИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 1 ХОД
ХОЛОДНЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 2 ХОДА

4.2



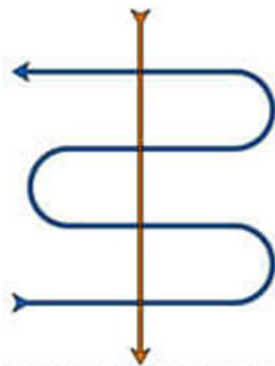
ГОРЯЧИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 1 ХОД
ХОЛОДНЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 2 ХОДА

4.3



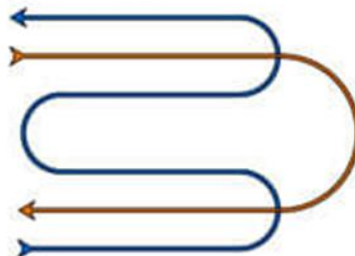
ГОРЯЧИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 1 ХОД
ХОЛОДНЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 4 ХОДА

4.4



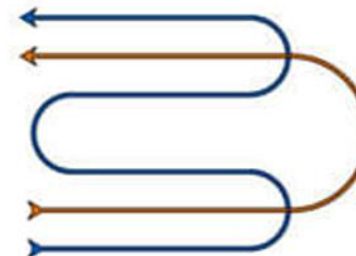
ПЕРЕКРЕСТНЫЕ ТОКИ
ГОРЯЧИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 1 ХОД
ХОЛОДНЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 4 ХОДА

4.5



ГОРЯЧИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 2 ХОДА
ХОЛОДНЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 4 ХОДА

4.6



ГОРЯЧИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 2 ХОД
ХОЛОДНЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ - 4 ХОДА

В литературе можно встретить довольно сложные формулы и графики для уточнённого расчёта средней разности температур для различных случаев движения потоков. По моему мнению, их использование не повышает точность расчёта теплообменника.

Посмотрим снова на формулу для нахождения площади поверхности теплопередачи

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{ср}}}$$

В неё есть величина, которая рассчитывается не очень точно — это коэффициент теплопередачи K .

А точность всего расчёта определяется максимальной погрешностью. Что толку, если мы, например, при вычислении объёма комнаты длину и ширину измерили очень точно, а высоту нашли «на глазок»? Точность вычисления объёма будет невысокой.

Поэтому стремиться к излишней точности в расчёте $\Delta t_{\text{ср}}$ особого смысла нет. Вполне достаточно взять среднее арифметическое между средними разностями температур для прямотока и противотока

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{прот}} + \Delta t_{\text{прям}}}{2}.$$

Примеры расчёта 1

Оба потока меняют свои температуры

Горячий поток охлаждается от $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 50 .

Холодный нагревается от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расчёт. Показываю подробно.

Расчёт. Показываю подробно.

Сначала организуем прямоток.

Рисуем две стрелки. Горячий поток сверху,
ХОЛОДНЫЙ СНИЗУ.



Теперь на стрелки наносим температуры

$$t_{1Н} = 120$$

$$t_{1К} = 50$$

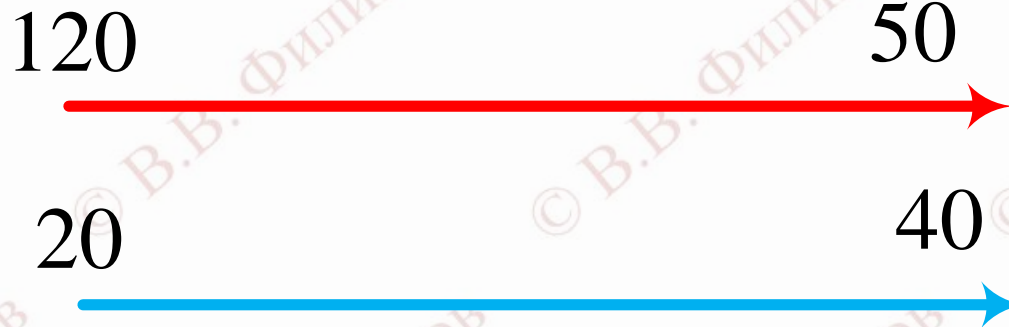


$$t_{2Н} = 20$$

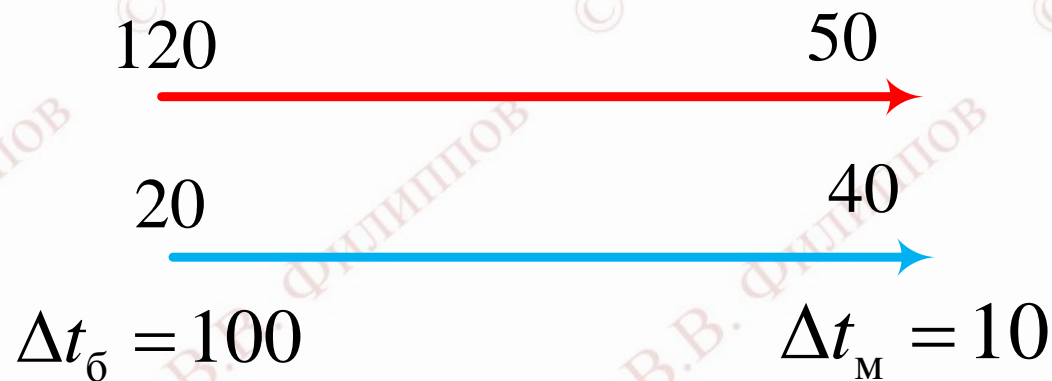
$$t_{2К} = 40$$



Буквы писать не обязательно. Достаточно
сделать так

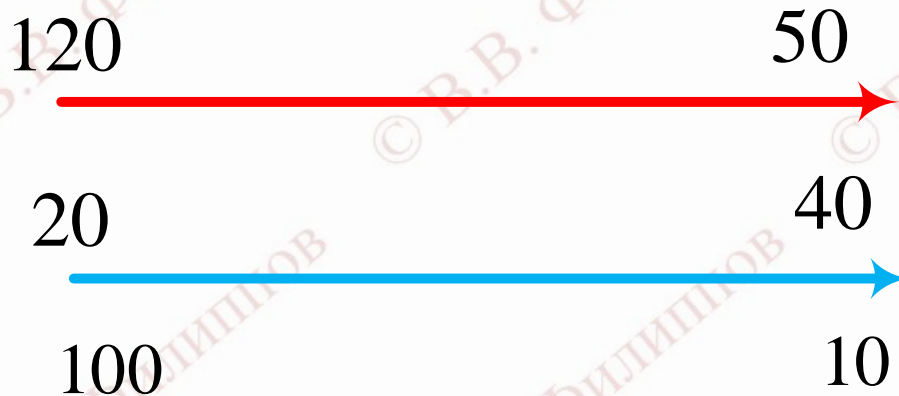


Теперь считаем разности температур на концах аппарата (запоминайте этот термин!). Одна разность будет бóльшая, вторая – меньшая



При наличии опыта писать, какая разница больше, а какая меньше, не нужно.

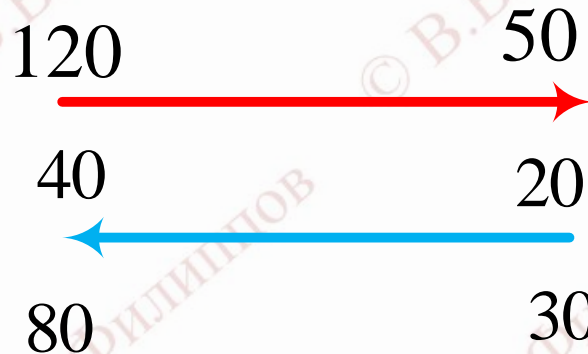
Достаточно так



Теперь считаем среднюю разность температур

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\sigma} - \Delta t_{\text{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\sigma}}{\Delta t_{\text{M}}}} = \frac{100 - 10}{\ln \frac{100}{10}} = 39^{\circ} \text{C} = 39 \text{K}$$

Теперь организуем противоток



Повторяем расчёт

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{80 - 30}{\ln \frac{80}{30}} = 51^{\circ} \text{C} = 51 \text{K}$$

Вам какая движущая сила больше нравится

– 39 градусов или 51?

Ответ здесь, в этой формуле

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{\text{ср}}}$$

Делаем вывод: если температуры обоих потоков изменяются, то противоток предпочтительнее.

Примеры расчёта 2

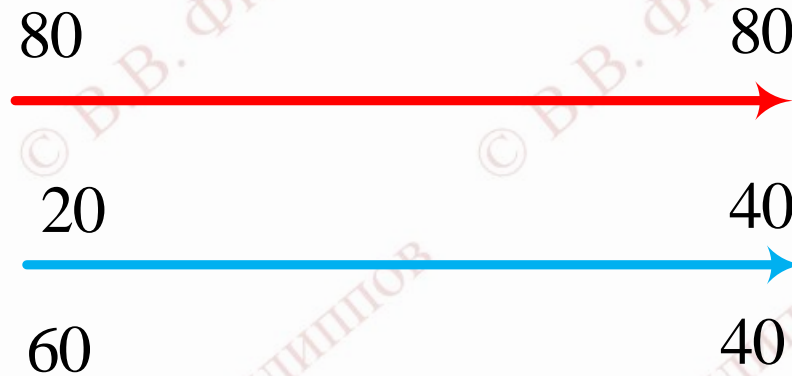
Горячий поток конденсируется, холодный
нагревается

Конденсируется бензол при температуре 80°C .

Вода (холодный нагревается) от 20°C до 40°C .

Снова обязательно рисуем схему теплообмена.

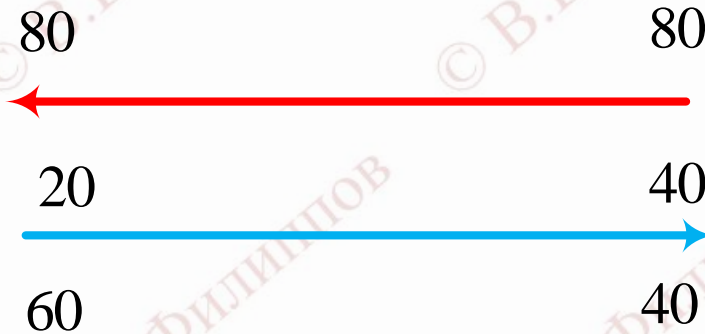
Но вот теперь прямоток и противоток равноценны. Проверим



Считаем среднюю разность температур

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{M}}}} = \frac{60 - 40}{\ln \frac{60}{40}} = 49^{\circ} \text{C} = 49 \text{ K}$$

Организуем противоток.



Разности температур на концах аппарата не изменились. Значит, не изменится и средняя разность температур.

Примеры расчёта 3

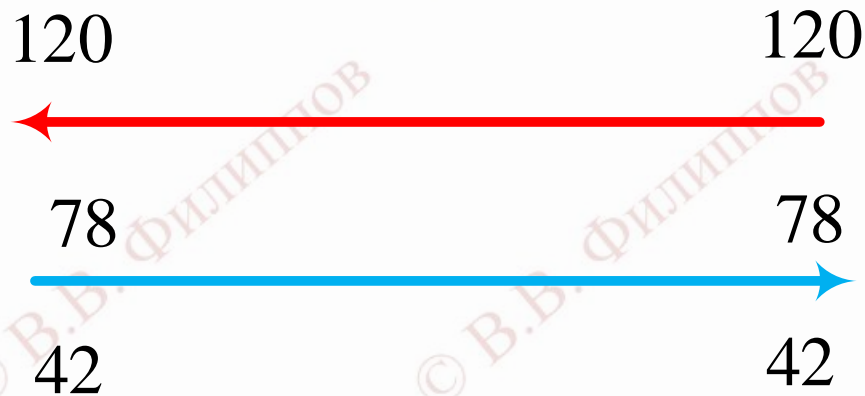
Горячий поток конденсируется, холодный
кипит

Требуется испарять этиловый спирт при
температуре 78°C .

Этиловый спирт — горячий поток или
холодный?

В качестве теплоносителя используется насыщенный водяной пар с температурой 120°C .

Схема теплообмена



Разности на концах аппарата равны. Средняя
разность температур равна 42°C . Ничего
вычислять не нужно!