

# Расчёт коэффициента теплоотдачи $\alpha$

Рассмотрим несколько случаев теплоотдачи.

1. Поток движется внутри труб в турбулентной области. В этом случае уравнение для расчёта критерия Нуссельта  $Nu$ , а следовательно, и коэффициента теплоотдачи, будет иметь вид

$$Nu = 0,021\varepsilon Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

где  $\varepsilon$  — поправочный коэффициент, учитывающий влияние длины трубного пучка, в большинстве случаев равен 1,

Скобка

$$\left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

учитывает направление теплового потока – **от жидкости или к жидкости**, т.е. охлаждается или нагревается жидкость. Нижний индекс «ст» означает, что все входящие в критерий Прандтля величины –  $c$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$  – берутся при температуре стенки, которую ещё надо найти.

Ранее мы отметили, что у капельных жидкостей с увеличением температуры величина критерия

Прандтля уменьшается

$$t \uparrow; Pr \downarrow$$

Следовательно, при нагревании капельных жидкостей, когда  $t_{\text{ст}} > t$ ,

$$\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}} > 1$$

Поэтому в инженерных расчётах принято, что если жидкость **нагревается**, то величина этой скобки принимается равной 1 (на самом деле она чуть больше 1)

$$\left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} = 1$$

А вот если жидкость **охлаждается**, то эту скобку придётся **искать**, **определив** сначала **температуру стенки**.

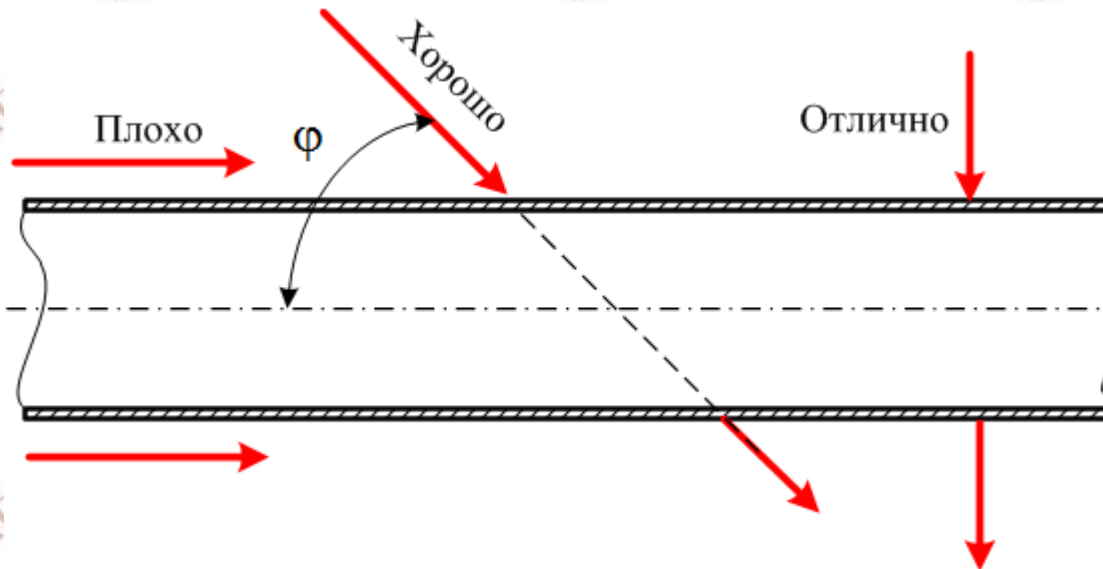
Если критерий Рейнольдса для потока в трубах оказался в переходной области (что весьма нежелательно), то используется менее надёжная формула

$$Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43}$$

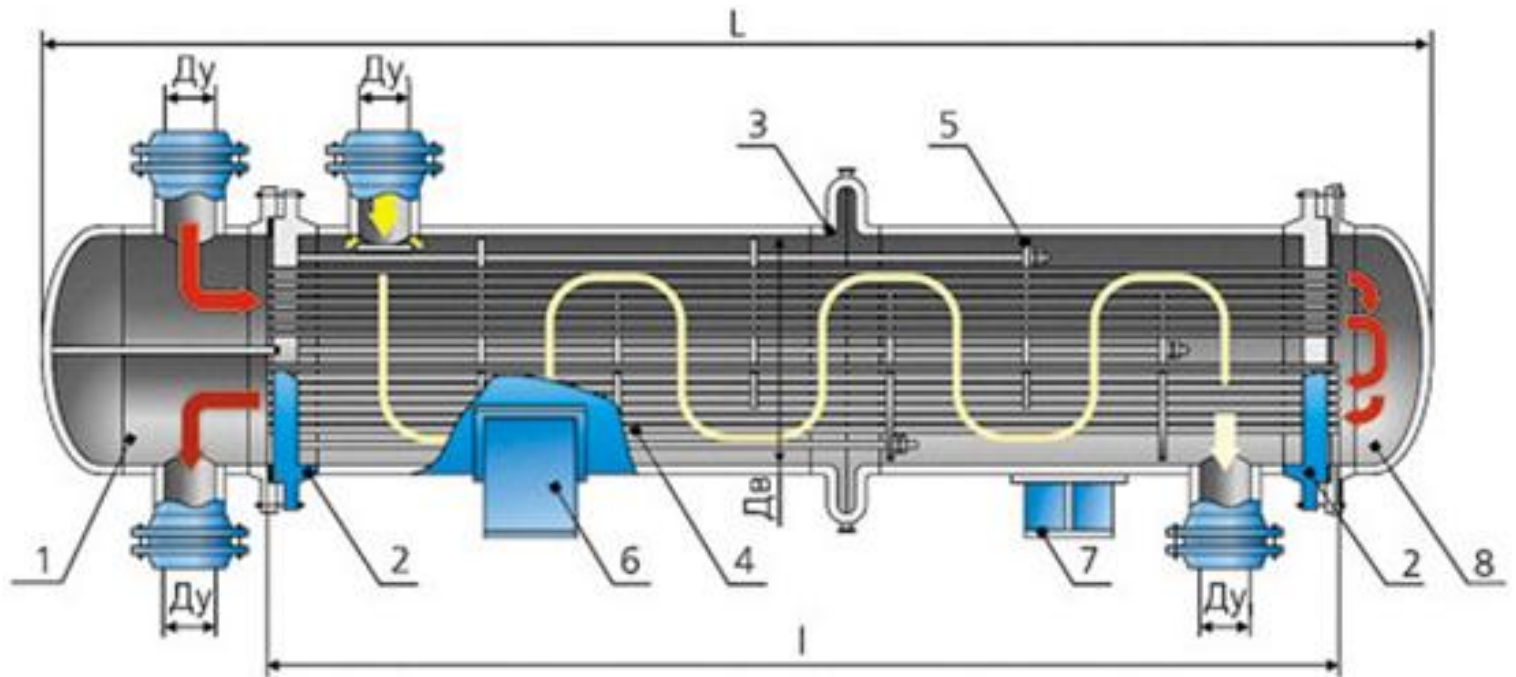
Про ламинарный режим я тут даже не упоминаю — он наш «враг».

## 2. Теплоотдача при поперечном обтекании пучка гладких труб при $Re > 1000$ .

Строго доказано, что теплоотдача лучше, если поток движется под большим углом атаки к оси труб

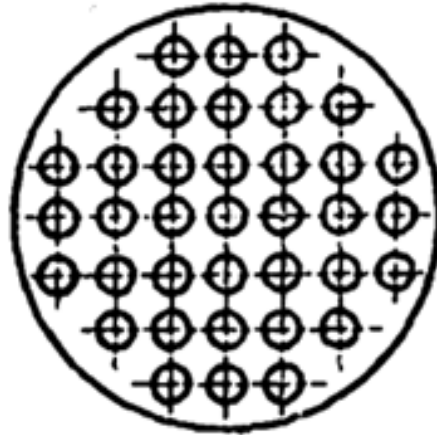


Именно по этой причине в межтрубное пространство кожухотрубчатых теплообменников устанавливают перегородки



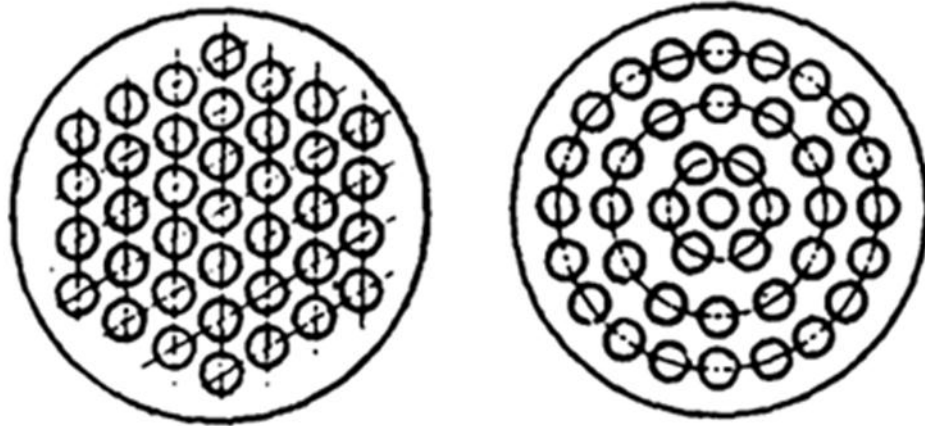


Но и это ещё не всё. Трубы в трубной решётке можно установить так, что между ними образуются коридоры. Такое расположение так и называют - коридорное



А можно трубы расположить так, что этих коридоров не будет. Такое расположение называют шахматным. Его ещё называют так:

- по сторонам окружностей,
- по сторонам шестиугольников



Так вот способ разбивки труб влияет на коэффициент теплоотдачи.

Для коридорных пучков формула имеет вид

$$Nu = 0,22\varepsilon_{\varphi} Re^{0,65} Pr^{0,36} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

А для шахматных пучков используется такая формула

$$Nu = 0,4\varepsilon_{\varphi} Re^{0,6} Pr^{0,36} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25},$$

В этих формулах коэффициент  $\varepsilon_\varphi$  учитывает угол атаки труб потоком. При углах от  $60^\circ$  до  $90^\circ$  этот коэффициент равен 1, при меньших — уменьшается.

# Теплоотдача при кипении

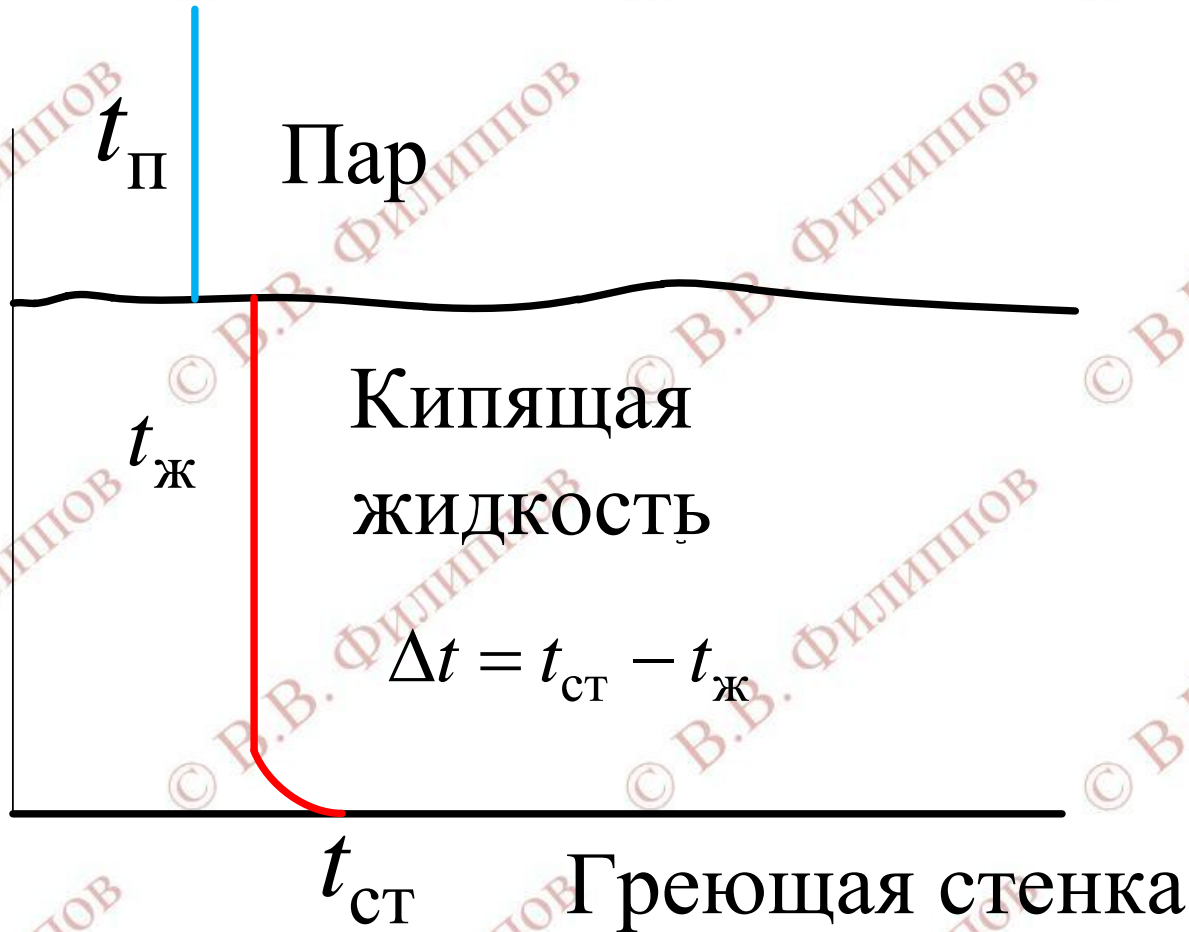
Кипением называется процесс парообразования в толще жидкости. Этот процесс хорошо известный каждому с детства. Для перевода жидкости в пар требуется подводить теплоту. Источником этой теплоты в химической промышленности, как правило, является насыщенный водяной пар (НВП).

Совершенно понятно желание интенсифицировать процесс кипения (как и вообще любой теплообменный процесс). На первый взгляд для этого достаточно увеличить тепловой поток  $Q$ . Действительно, чтобы кипение воды в кастрюле стало более интенсивным, достаточно повернуть ручку конфорки.

При этом кроме очевидного возрастания теплового потока  $Q$  происходит увеличение температуры стенки, через которую передаётся теплота. Следовательно, увеличивается разность температур  $\Delta t$  между стенкой  $t_{ст}$  и кипящей жидкостью  $t_{ж}$ .

$$\Delta t = t_{ст} - t_{ж}.$$

Интересно посмотреть на изменение температуры по высоте кипящей жидкости.





То кипение, которое мы обычно наблюдаем, называется **пузырьковым**.

Оно характеризуется высокой интенсивностью. Дома мы наблюдаем именно такое кипение. Но есть и другой тип кипения.

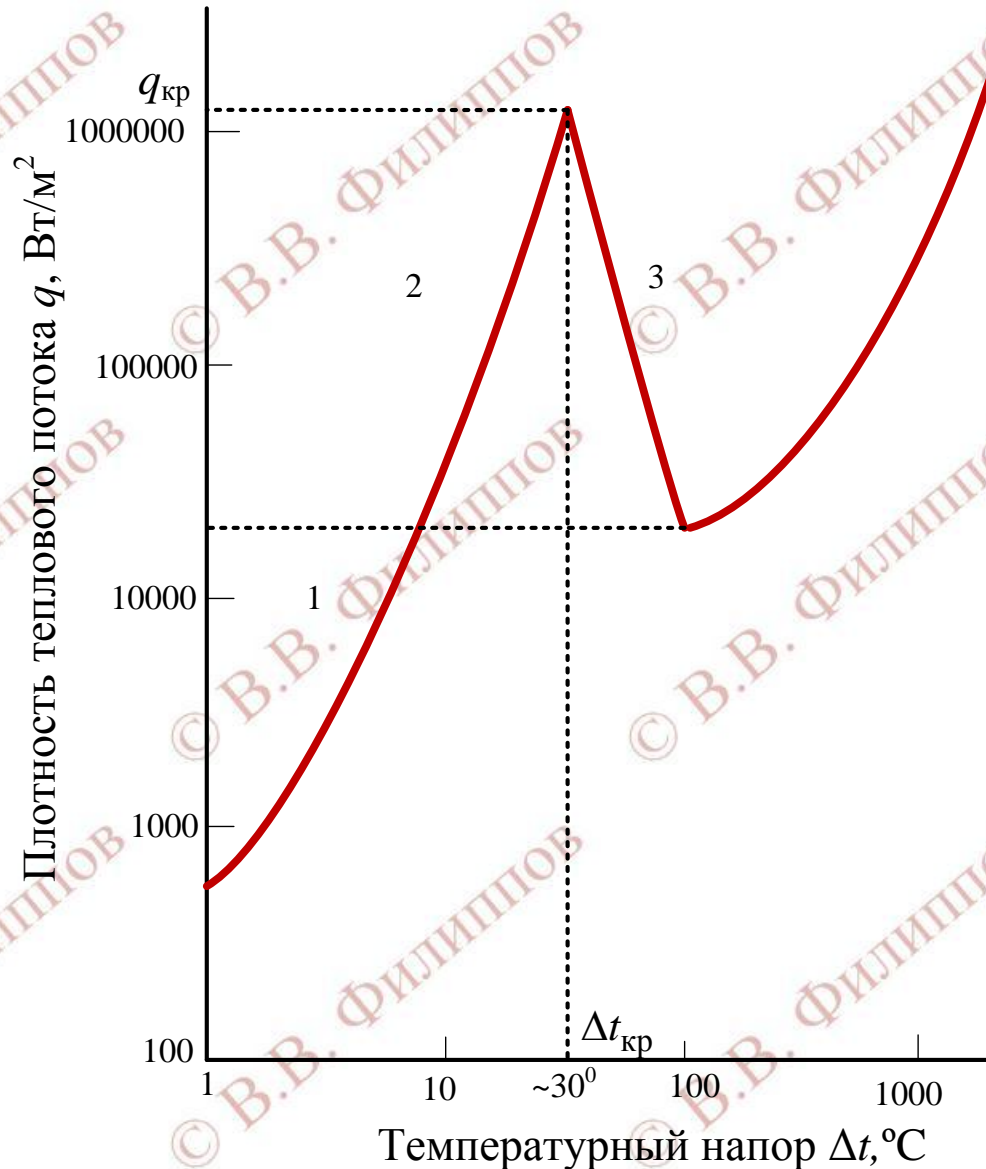
Если стряхнуть несколько капель воды на раскалённую сковородку, то мы увидим, что образовавшиеся маленькие шарики, вместо того чтобы мгновенно испариться, начинают бегать по раскалённой поверхности. Вода кипит, но гораздо медленнее. Такое кипение называется **плёночным**.

Причина плёночного кипения проста – между греющей поверхностью и жидкостью появилась паровая прослойка. А пар, как все газы, плохо проводит теплоту. У него низкий коэффициент теплопроводности. Переход от одного режима к другому назвали **кризисом теплоотдачи при кипении.**

Совершенно понятно желание найти границу между этими двумя режимами кипения — пузырьковым и плёночным. Изучением влияния разности температур  $\Delta t$  на коэффициент теплоотдачи (или, что то же самое, на плотность теплового потока) при кипении изучал японский учёный Сиро Нукияма.

Им была получена зависимость плотности теплового потока  $q$  от температурного напора  $\Delta t$  при кипении воды. График этой зависимости назвали кривой Нукияма

# Кривая Нуклямы



1 – область испарения со свободной поверхности; 2 – область развитого пузырькового кипения; 3 – плёночное кипение

Из графика следует, что при достижении некоторого критического значения температурного напора  $\Delta t_{кр}$  наблюдается парадоксальный тепловой поток вдруг начинает резко уменьшаться. Следовательно,

уменьшается и коэффициент теплоотдачи, который равен

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t}$$

Дальнейшие исследования показали, что, например, для бензола величина  $\Delta t_{кр}$  составляет примерно  $\sim 40^\circ\text{C}$ , для изопропилового спирта  $\sim 50^\circ\text{C}$ , для бутилового спирта  $\sim 33^\circ\text{C}$ .



При расчёте кипятильника хочется приблизиться к критическому значению температурного напора, а затем немного отойти от него. Тогда будет получен высокий коэффициент теплоотдачи к кипящей жидкости.

Критическое значение плотности теплового потока, при котором пузырьковое кипение переходит в плёночное, вычисляют по уравнению

$$q_{\text{кр}} = 1,4r \cdot \rho_{\text{п}}^{0,5} (g \cdot \sigma \cdot \rho)^{0,25}$$

В этом уравнении:  $r$  - удельная теплота испарения;  $\rho_{\text{п}}$  - плотность образующегося при кипении пара при рабочих условиях в аппарате;  $\sigma$  - поверхностное натяжение кипящей жидкости;  $\rho$  - плотность жидкости;  $g$  - ускорение свободного падения.

Итак, при расчёте кипятильника появляется задача, которой не было в расчётах других аппаратов – найти критическое значение плотности теплового потока  $q_{кр}$ . Эта величина должна быть больше рабочей плотности теплового потока  $q_{расч}$

$$q_{кр} > q_{расч}$$

Расчёт коэффициента теплоотдачи при кипении — довольно сложная задача. Предложено несколько способов его расчёта, но не один не даёт надёжного результата. Это объясняется тем, что при кипении жидкости приходится учитывать слишком большое число факторов.

При расчёте кипятильника обязательно придётся искать две температуры:

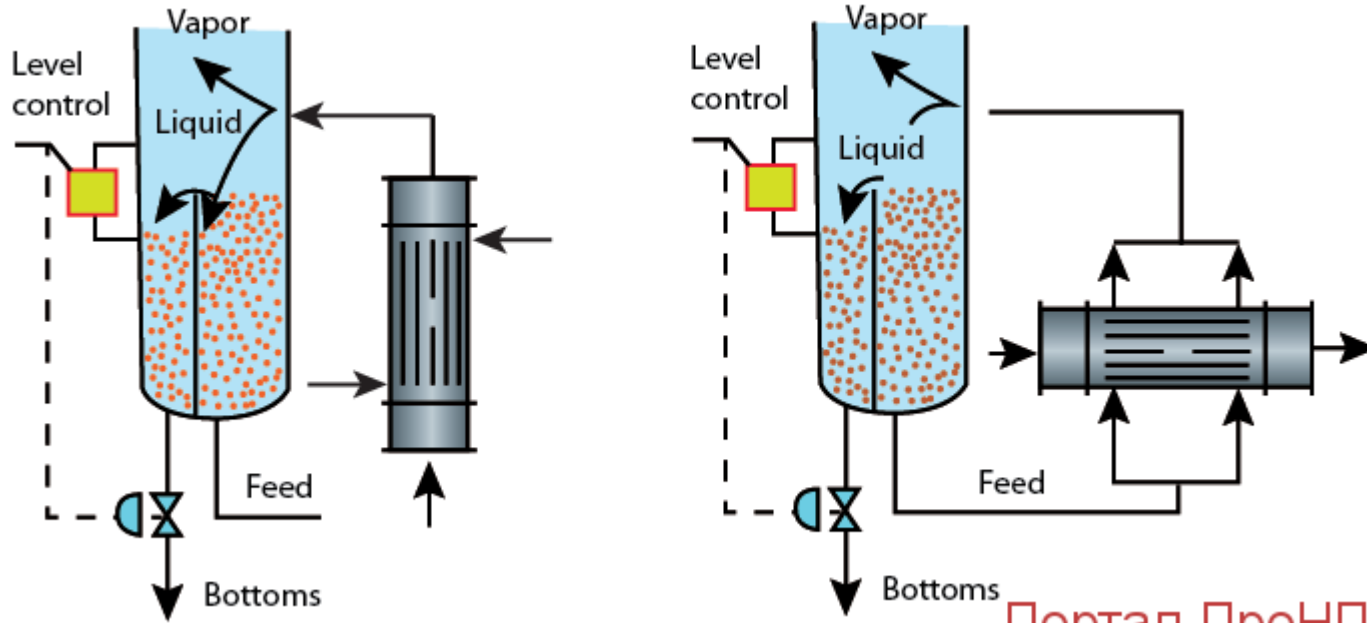
температуру начала кипения смеси, которая заходит в аппарат, и температуру выходящей парожидкостной смеси с заданной долей отгона  $e$ .

Доля отгона — это отношение массы образовавшейся паровой фазы  $G$  к массе исходного сырья  $F$

$$e = \frac{G}{F} \quad 0 \leq e \leq 1$$

Если испарилось всё сырьё, то  $e = 1$ , а если ничего не испарилось, то  $e = 0$ . В реальных кипятильниках  $\varepsilon \approx 0,5 - 0,8$

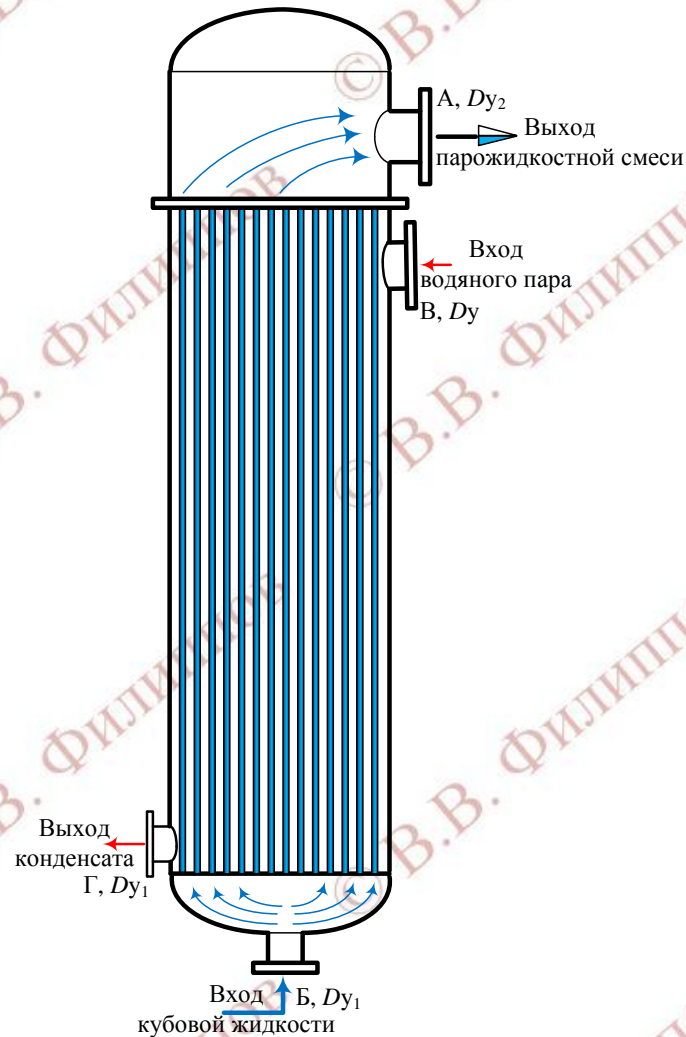
Промышленные кипяильники бывают двух видов — вертикальные термосифонные и горизонтальные с паровым пространством (ребойлеры)



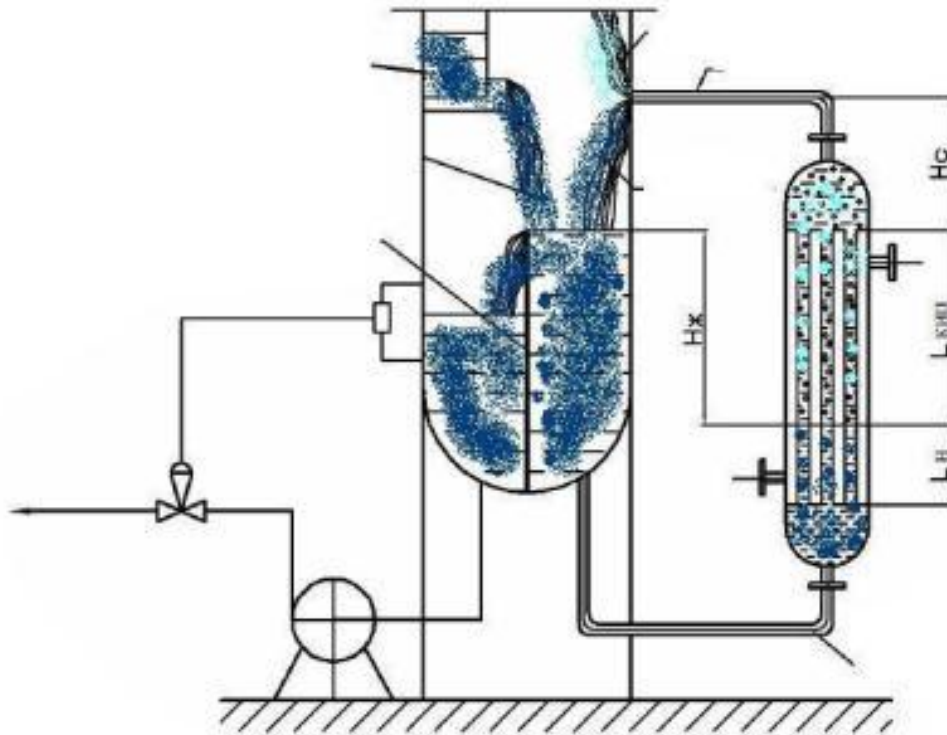
Портал ПроНПЗ



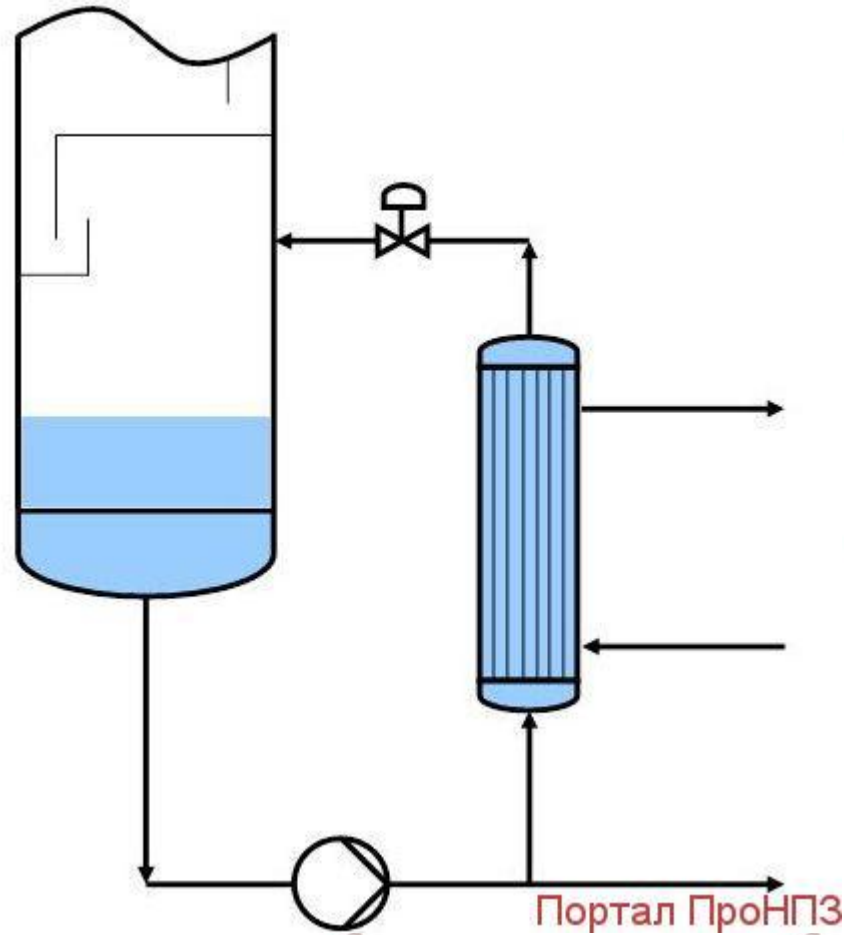
# Вертикальный термосифонный кипятильник



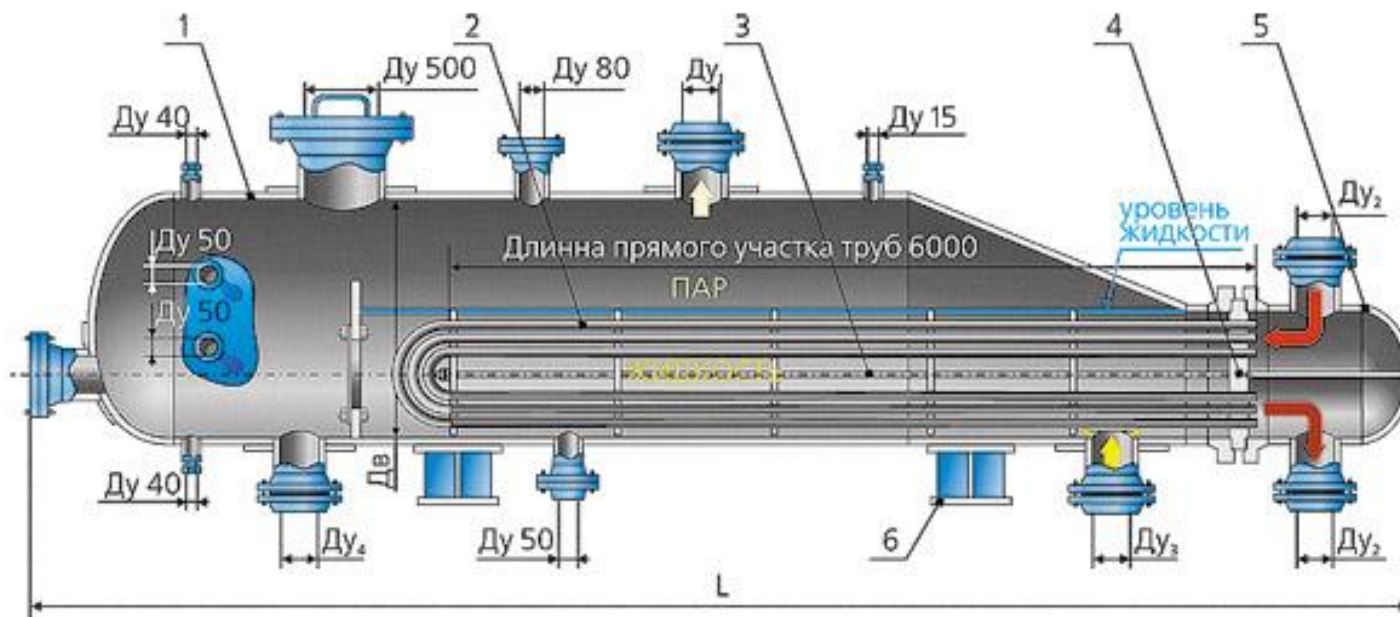
# Вертикальный термосифонный кипятильник



# Вертикальный термосифонный кипятильник с вынужденной циркуляцией



# Горизонтальный кипятильник с паровым пространством (ребойлер)



# Горизонтальный кипятильник с паровым пространством (ребойлер)

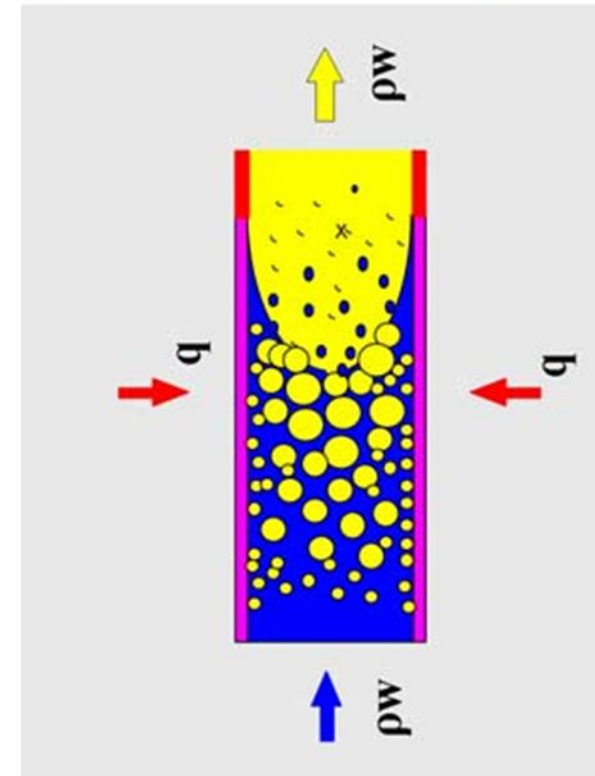
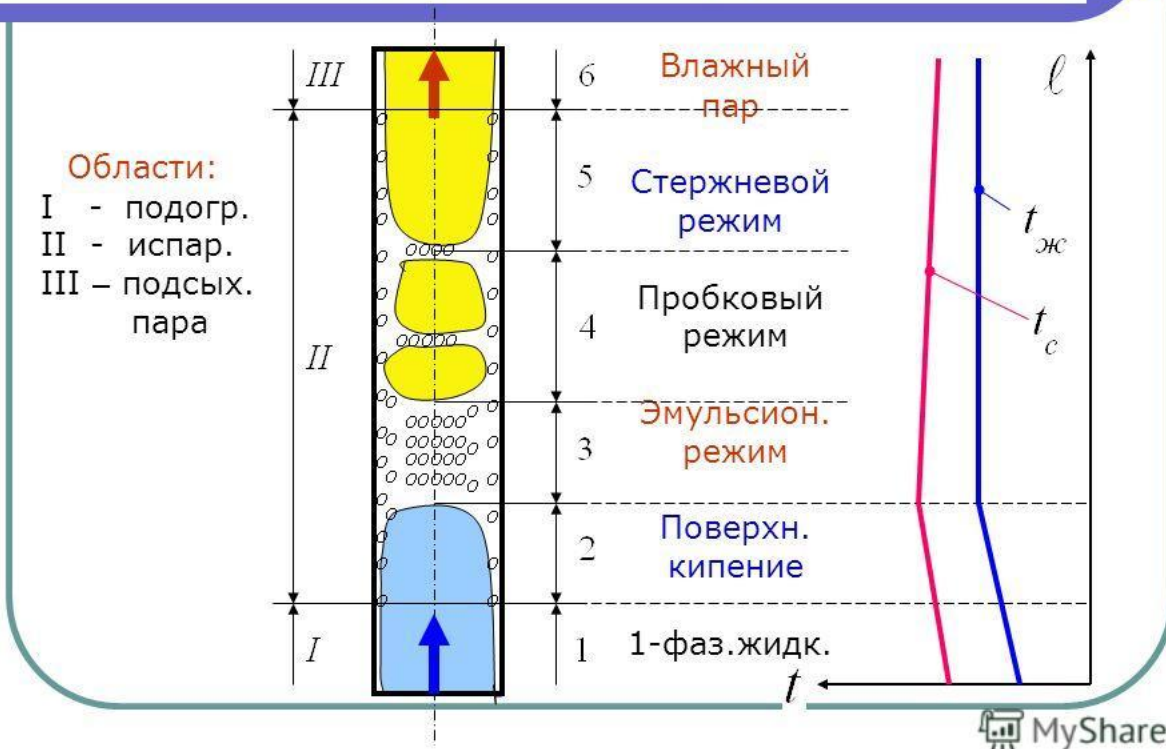
<http://www.bronswerk.com/ru/%D0%A0%D0%B5%D0%B1%D0%BE%D0%B9%D0%BB%D0%B5%D1%80/PT190/>





На этом рисунке показан переход жидкости в пар о одиночной вертикальной трубе.

### Структура потока при кипении жидкости в вертикальной трубе



MyShared

# Теплоотдача при конденсации пара

Конденсация пара происходит в процессах ректификации, т.е. разделения однородных жидких смесей. Верхний продукт уходит с верха колонны в виде пара и попадает в конденсатор, где превращается в жидкость.

По внешнему виду конденсатор – обычный кожухотрубчатый теплообменник. Теоретически его можно установить вертикально, а можно горизонтально.

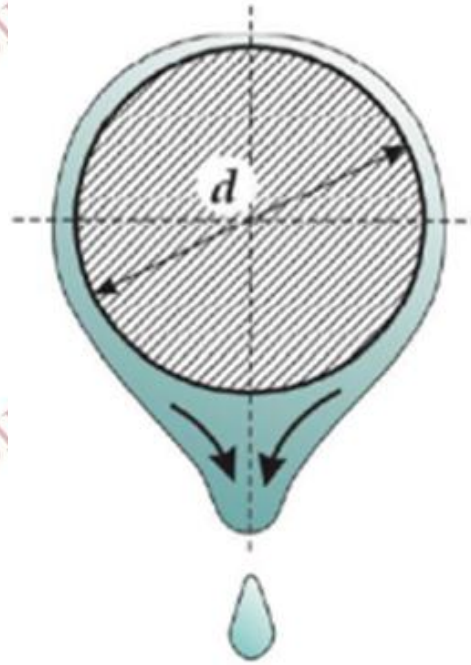


В первом случае конденсация будет происходить на пучке вертикальных труб.

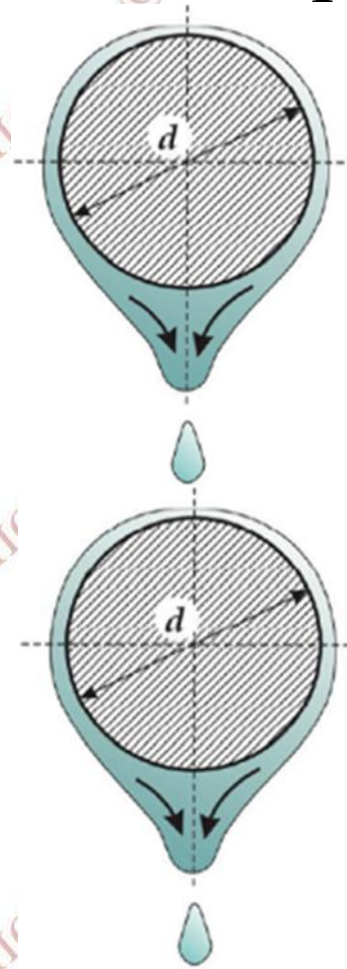
Образовавшаяся плёнка конденсата стекает по трубе и при этом закрывает (экранирует) теплопередающую поверхность. В результате на верхнем участке труб процесс протекает эффективно. Но по мере стекания плёнки теплоотдача от пара к стенке трубы ухудшается.

Кроме того, при вертикальной установке аппарат трудно обслуживать: вынимать трубный пучок для замены или чистки. Поэтому вертикальная установка конденсаторов практически не применяется.

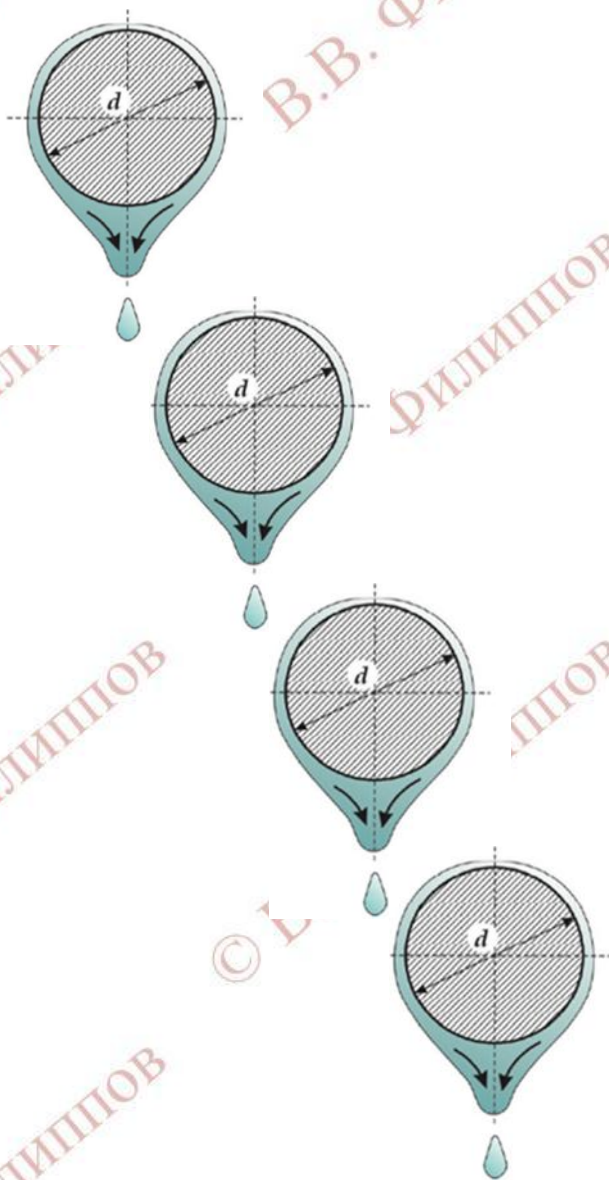
При горизонтальной установке аппарата плёнка  
жидкости стекает с труб, освобождая  
поверхность для конденсации.



Имеет значение также расположение труб в трубном пучке. Если трубы будут расположены коридорно, то конденсат с верхней трубы будет стекать на нижнюю



# Предпочтительнее вот такое расположение труб



Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формулам:

для вертикального пучка

$$\alpha_{\text{вер}} = 3,78 \times \lambda \times \sqrt[3]{\frac{\rho^2 d_n n}{\mu G}}$$

для горизонтального пучка

$$\alpha_{\text{гор}} = 2,02 \varepsilon \times \lambda \times \sqrt[3]{\frac{\rho^2 n L}{\mu G}}$$

При этом всегда  $\alpha_{\text{верт}} < \alpha_{\text{гор}}$

В этих формулах:

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности конденсата, т.е. жидкости;

$\rho$  – плотность конденсата;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости конденсата;

$n$  – число труб в пучке;

$L$  – длина труб;

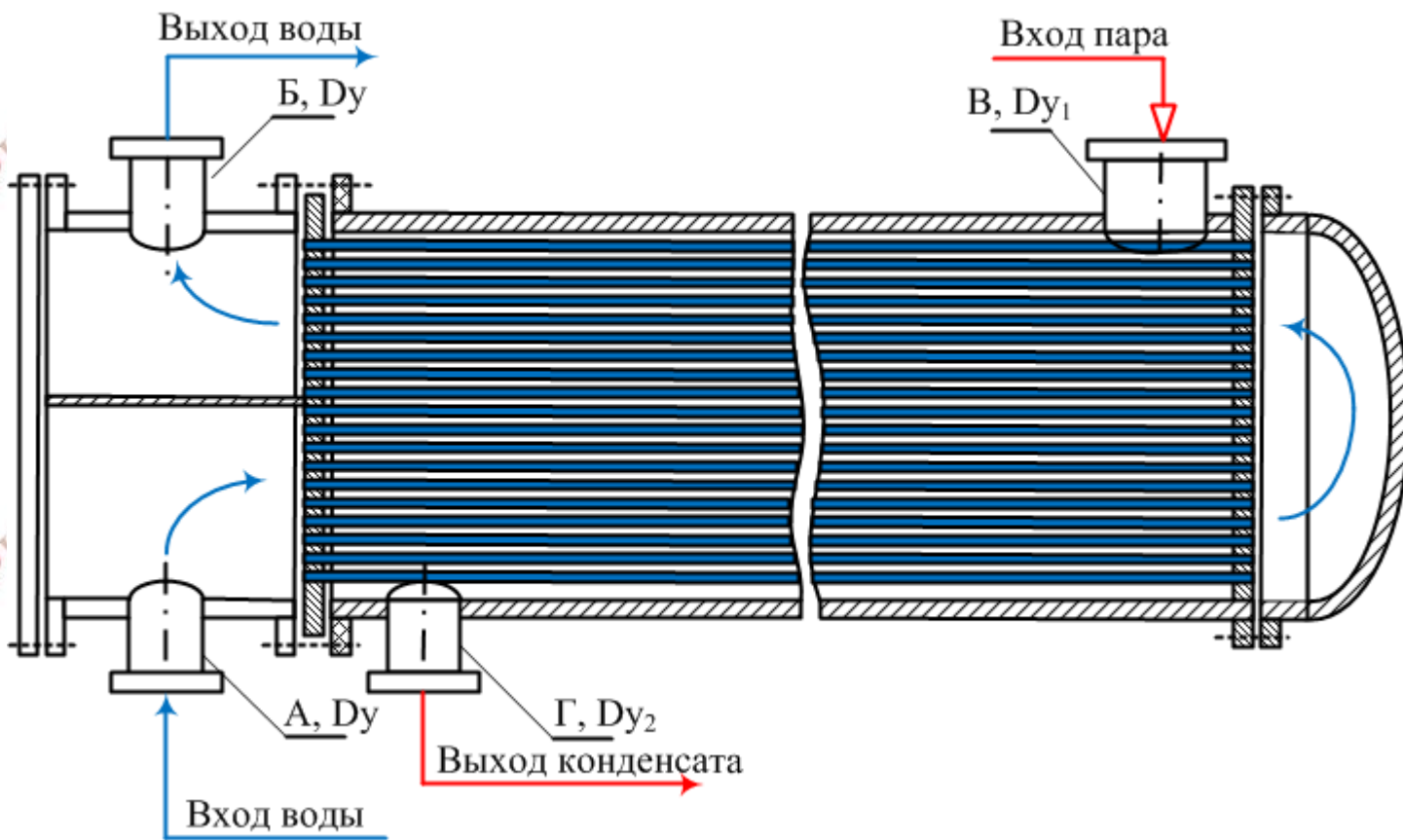
$d_n$  – наружный диаметр трубы,

$G$  – производительность конденсатора по пару.

# Горизонтальный конденсатор

1. Пар всегда подаётся только сверху!

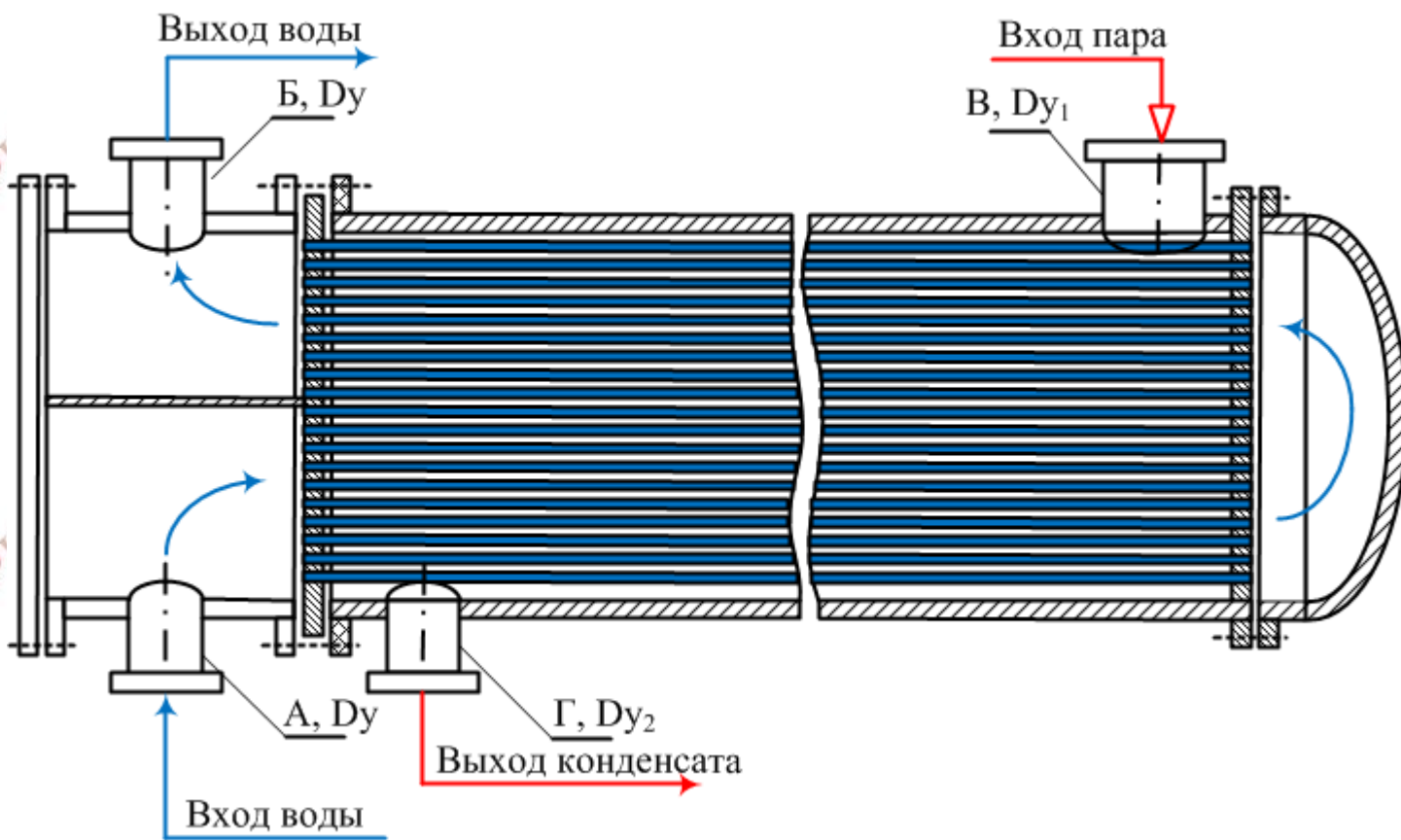
2. Перегородок в межтрубном пространстве нет!



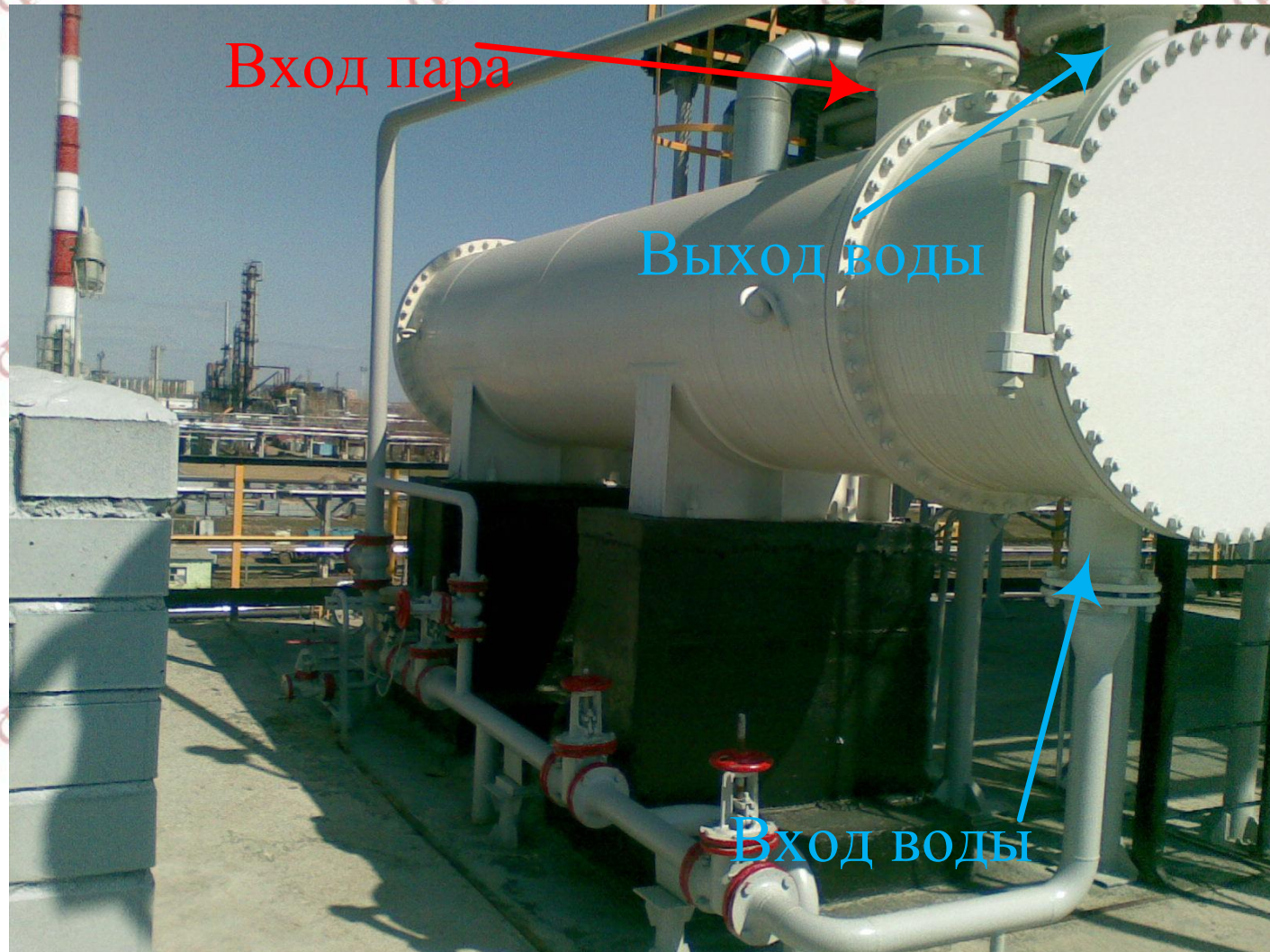


# Горизонтальный конденсатор

3. Диаметр штуцера ввода пара всегда больше, чем вывода конденсата  $D_B > D_\Gamma$

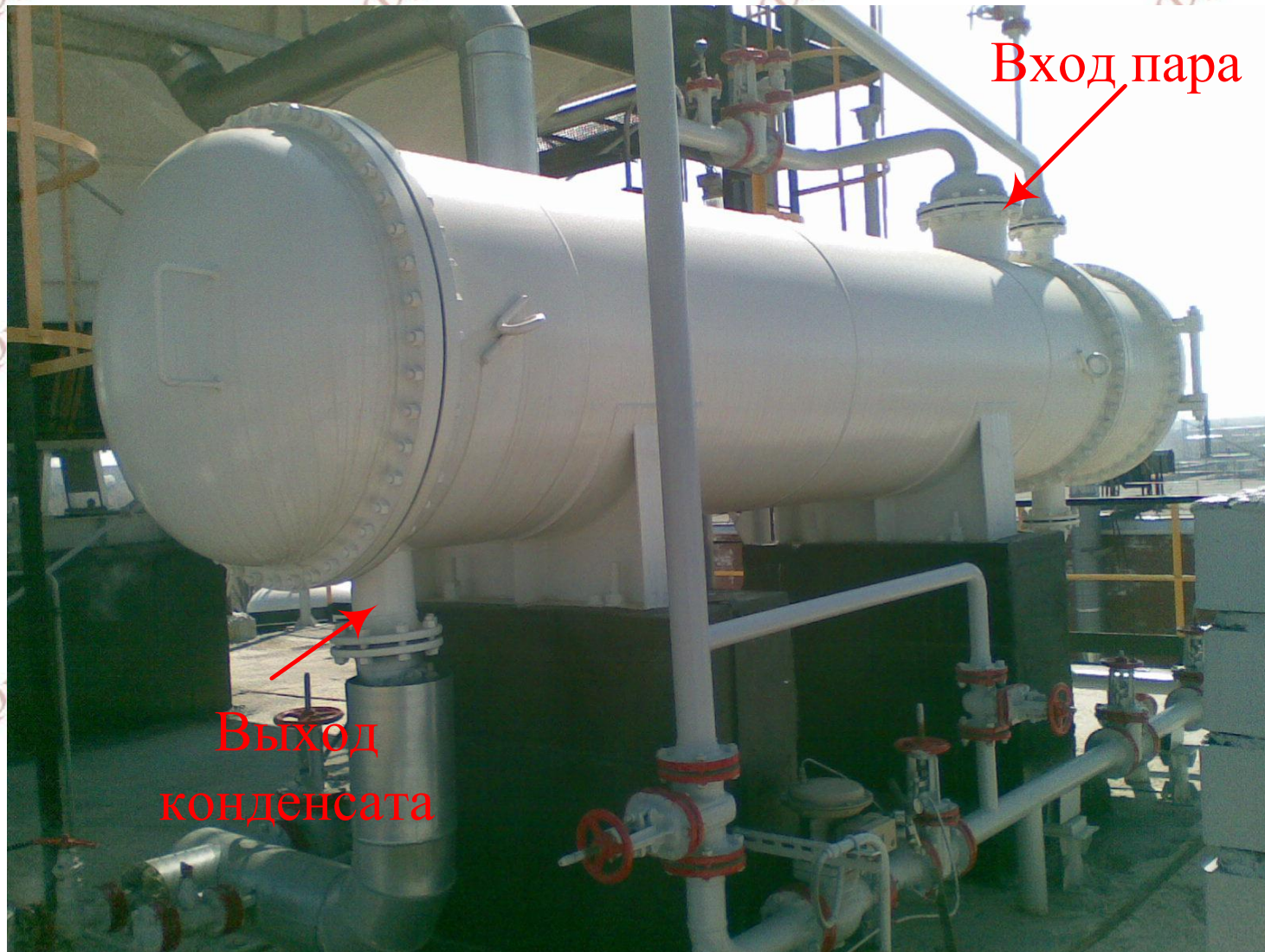


# Горизонтальный конденсатор КНПЗ





# Горизонтальный конденсатор КНПЗ



В конденсаторе коэффициент теплоотдачи от пара к трубам  $\alpha_1$  как правило всегда меньше коэффициента теплоотдачи от труб к воде  $\alpha_2$

$$\alpha_1 < \alpha_2$$

К чему это приводит, рассмотрим позже.