

Гидродинамика пароводяного тракта котельных установок

Глава 8

ЦИРКУЛЯЦИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В КОТЛЕ

Что это?

Какие типы циркуляции?

Назначение циркуляции?

Надежная работа котельной установки требует такой организации процессов, происходящих в пароводяной его части, которые обеспечивают максимальное приближение температуры стенки к температуре рабочей среды

ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ

- средняя скорость пароводяной смеси ($w_{\text{ср}}$);
- приведенную скорости воды (w_0') и пара (w_0'');
- скорость циркуляции (w_0);
- массовое паросодержание потока пароводяной смеси (x);
- истинное паросодержание потока пароводяной смеси (y).

ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ПАРОВОДОЯНОЙ СМЕСИ

Массовый расход смеси (кг/с) в данном сечении представляет собой сумму массовых расходов воды и пара:

$$G_{\text{см}} = G' + G''$$

Средняя скорость пароводяной смеси (м/с) в данном сечении представляет собой отношение массового расхода к полному внутреннему сечению f :

$$w_{\text{ср}} = G_{\text{см}} / f_0 \rho_{\text{см}}$$

Приведенные скорости (м/с) воды (w_0') и пара (w_0'') определяются по формулам:

$$w_0' = G' / f_0 \rho'; w_0'' = G'' / f_0 \rho''$$

ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ

Скоростью циркуляции называется скорость, которую бы имела вода, если бы она протекала через сечение с тем же массовым расходом, что и пароводяная смесь (т.е. скорость воды на входе в подъемные парогенерирующие трубы):

$$w_0 = G_{\text{см}} / f_0 \rho'$$

Массовая скорость для любого участка трубы постоянна:

$$\rho' w_0 = \rho_{\text{см}} w_{\text{см}} = \text{const}$$

Массовое паросодержание потока пароводяной смеси, или доля пара в пароводяном потоке, находится из формулы:

$$x = G'' / G_{\text{см}}; x = (i_{\text{см}} - i') / r$$

ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ

Массовое влагосодержание ПВС:

$$1 - x' = G'' / G_{\text{см}}$$

Объемное паросодержание ПВС определяется следующим образом:

$$\beta = V'' / V_{\text{см}}$$

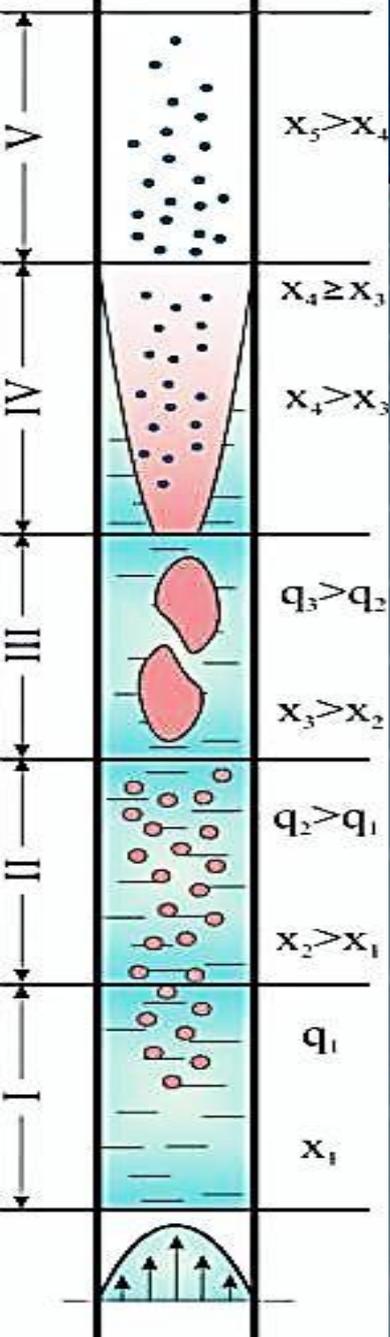
Истинное паросодержание потока пароводяной смеси определяется по формуле:

$$y = f'' / f_0$$

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА:

1. В вертикальных трубах
2. В горизонтальных трубах
3. В гйбах труб

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ



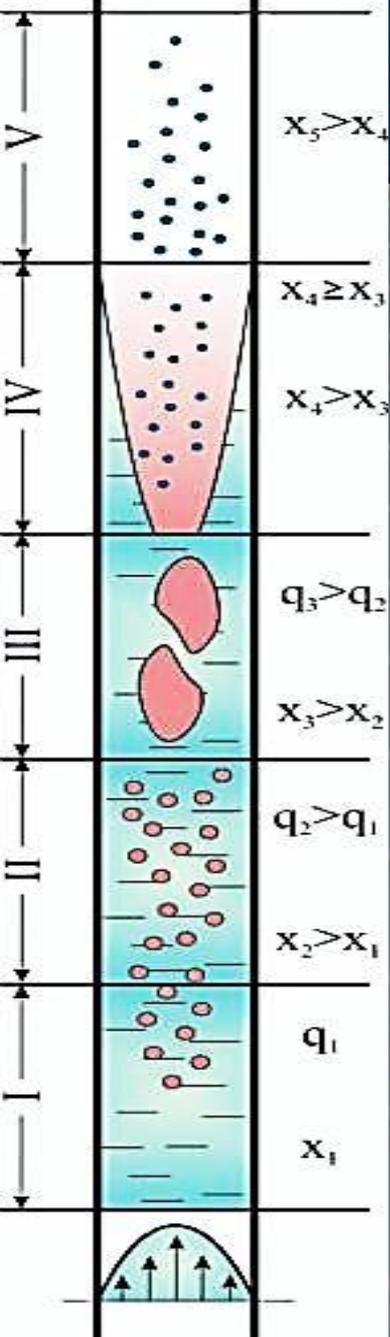
участок I - *пузырьковый*

- ($t_{cm} < t_H$) - область однофазного потока
ЖИДКОСТИ

- ($t_{cm} > t_H$) - ядро потока еще не догрето до t_H , а пристенный слой перегрет, на стенке происходит образование паровых пузырей

- происходит постепенный прогрев ядра потока, толщина пристенного слоя с паровыми пузырьками увеличивается и пристенные двухфазные слои смыкаются

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ



участок II - *эмульсионный режим*

- возрастает тепловой поток на парогенерирующие трубы и увеличивается паросодержания в ПВС.

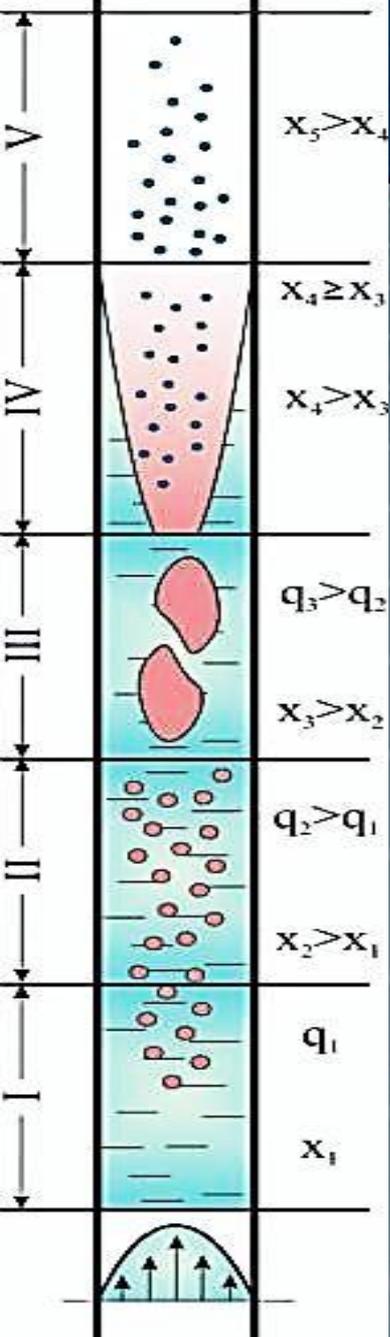
Паровая фаза распределена в потоке в виде небольших объемов, между которыми находится слой жидкости

участок III – *снарядным*

- увеличением паросодержания и скорости движения ПВС водяная пленка, омывающая трубу изнутри, становится тоньше

- пузырьки пара начинают объединяться в крупные конгломераты, и пузырьковый режим сменяется снарядным

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ



участок IV - дисперсно-кольцевой (стержневой режим)

- происходит разрыв жидких пленок между паровыми объемами,

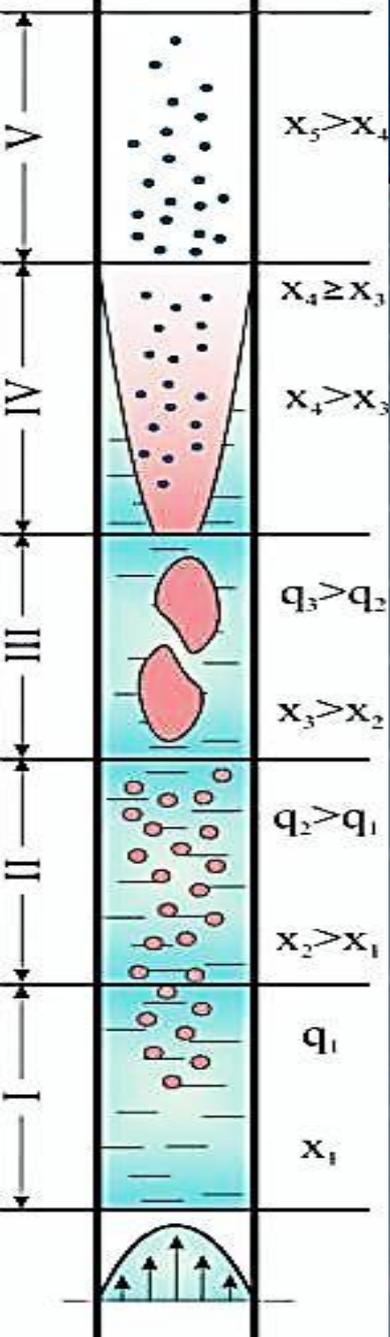
- паровой объем образует в центре трубы сплошной паровой поток, в котором содержатся водяные капли

участок V - кольцевой режим

- вода срывается с внутренней стенки трубы и уносится потоком пара, а тончайшая водяная пленка на стенке высыхает

- вода заполняет центральное сечение парогенерирующей трубы, а пар отделяет поток жидкости от теплообменной поверхности

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ



участок I - *пузырьковый*

участок II - *эмульсионный режим*

участок III - *снарядным*

участок IV - *дисперсно-кольцевой (стержневой) режим*

участок V - *кольцевой режим*

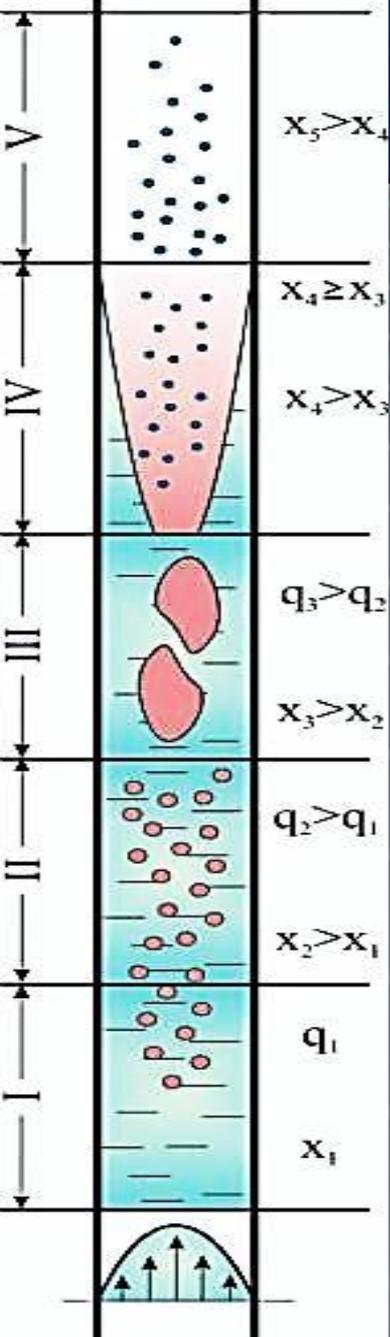
Переход от пузырькового к эмульсионному режиму осуществляется при $x > 10\%$.

Начало развития стержневого режима зависит от происхождения при $x > 35 - 50\%$,

Переход к обращенному дисперсно-кольцевому режиму – при $x > x_{кр}$ ($\sim 90\%$).

В котлах с естественной циркуляцией желательно иметь $x > 25 - 30\%$ (т.е. пузырьковый и дисперсно-кольцевой режимы).

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ



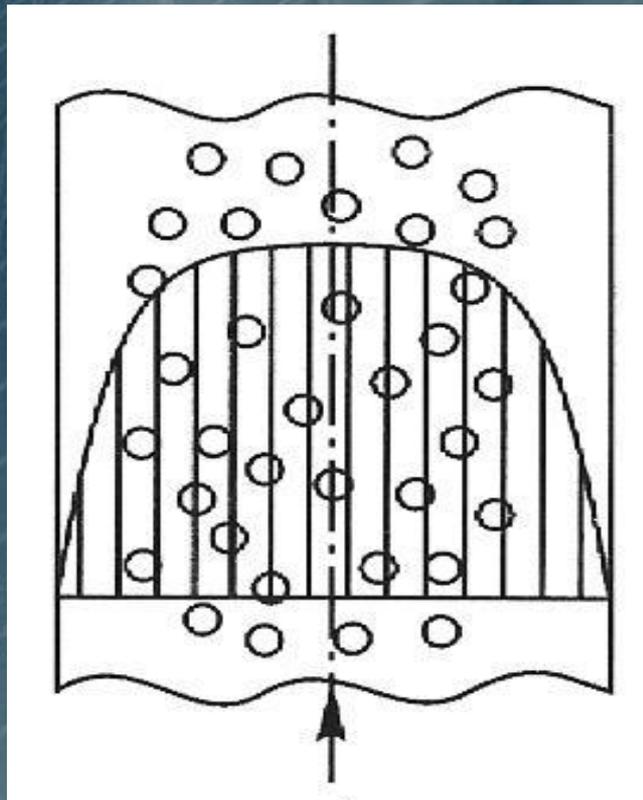
Кризисом теплообмена называют режимы ухудшения теплообмена, приводящие к резкому увеличению температуры металла.

Кризис теплообмена первого рода наблюдается при пузырьковом режиме течения: *жидкость вскипает на внутренней поверхности трубы, в результате чего вблизи внутренней стенки образуется паровой объем, что приводит к резкому снижению α_2 и резкому увеличению $t_{ст}$*

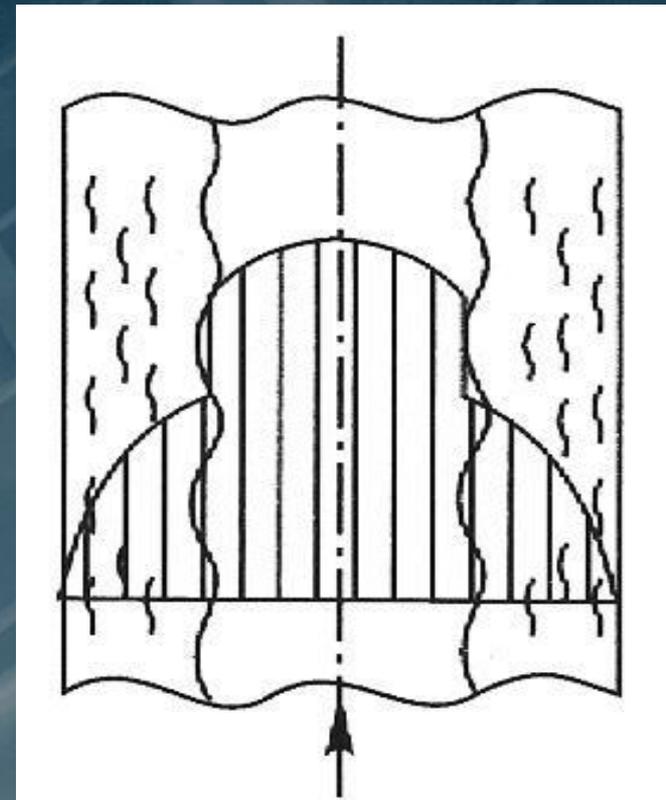
Кризис теплообмена второго рода наблюдается при дисперсно-кольцевом режиме течения

ЭПЮРА СКОРОСТЕЙ ПВС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Пузырьковый режим



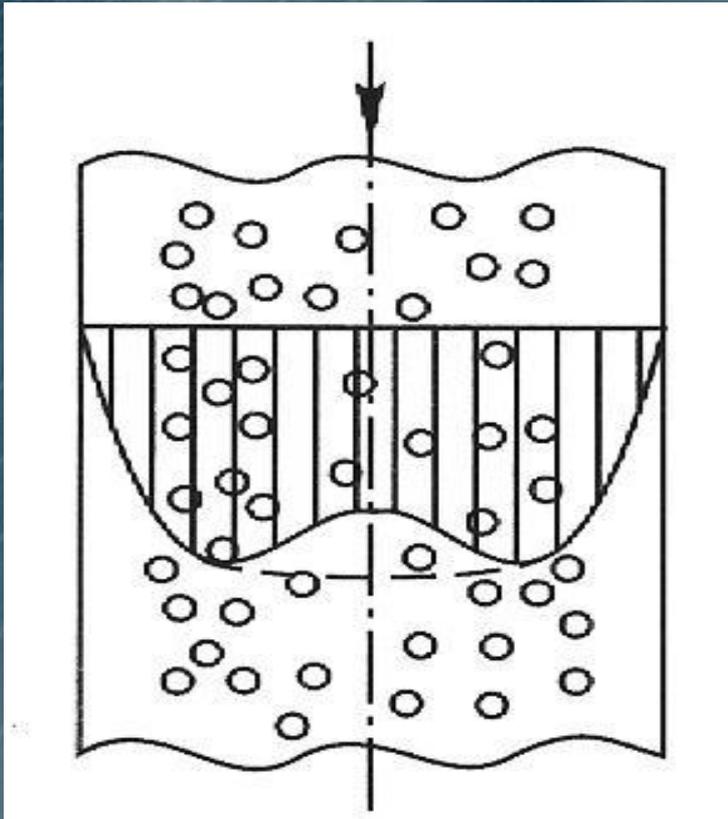
Кольцевой режим



Подъёмное движение

ЭПЮРА СКОРОСТЕЙ ПВС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Опускное движение

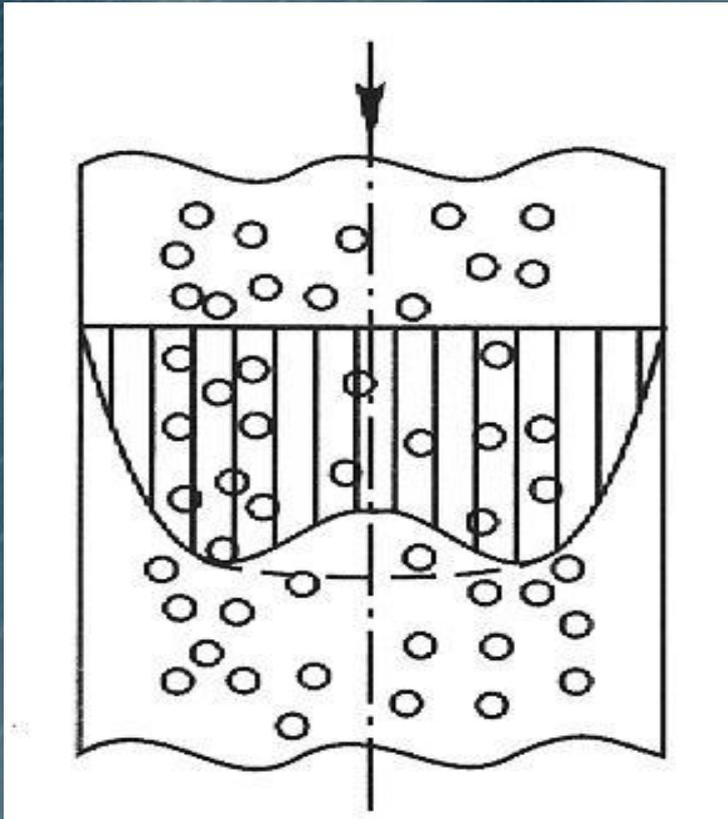


Паровая фаза стремится к оси трубы, при этом за счет силы Архимеда движение центральной части потока замедляется и профиль скорости искажается (сплошная линия). Паровые пузырьки, находящиеся в центре потока, под действием аэродинамической силы направляются от оси трубы в сторону возрастания скорости

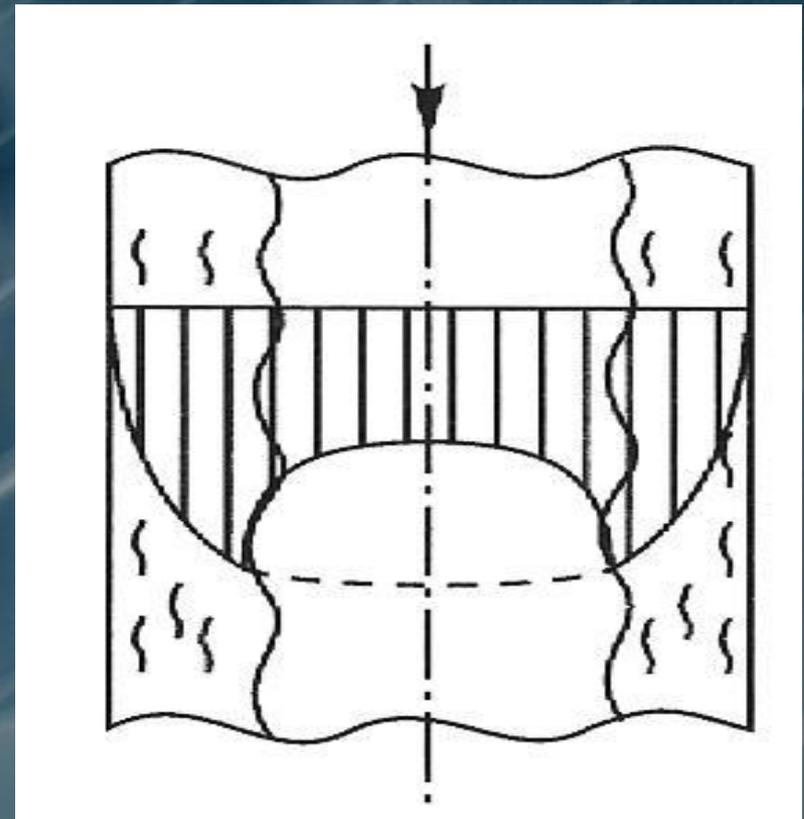
Пузырьковый режим

ЭПЮРА СКОРОСТЕЙ ПВС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Опускное движение

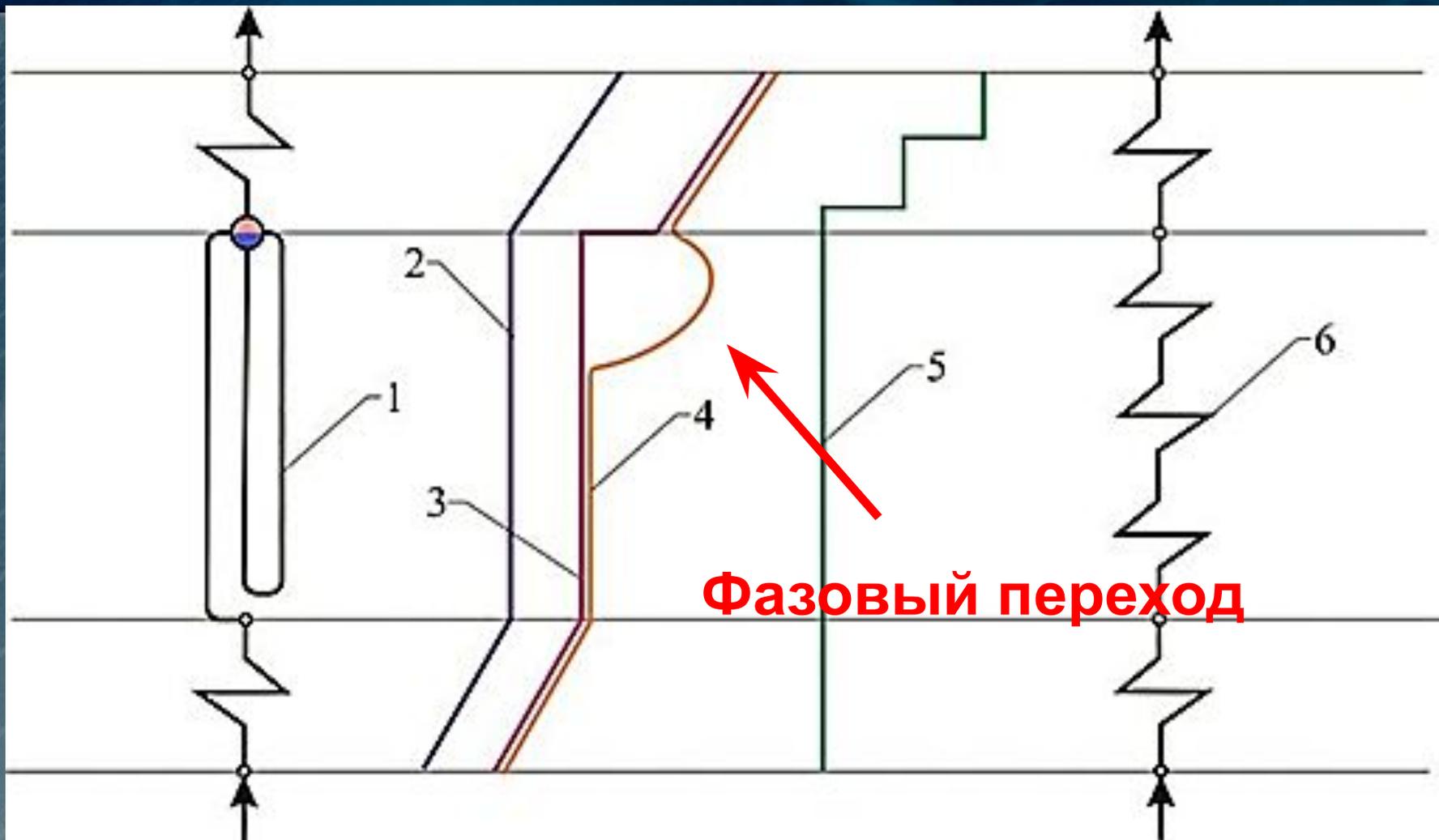


Пузырьковый режим



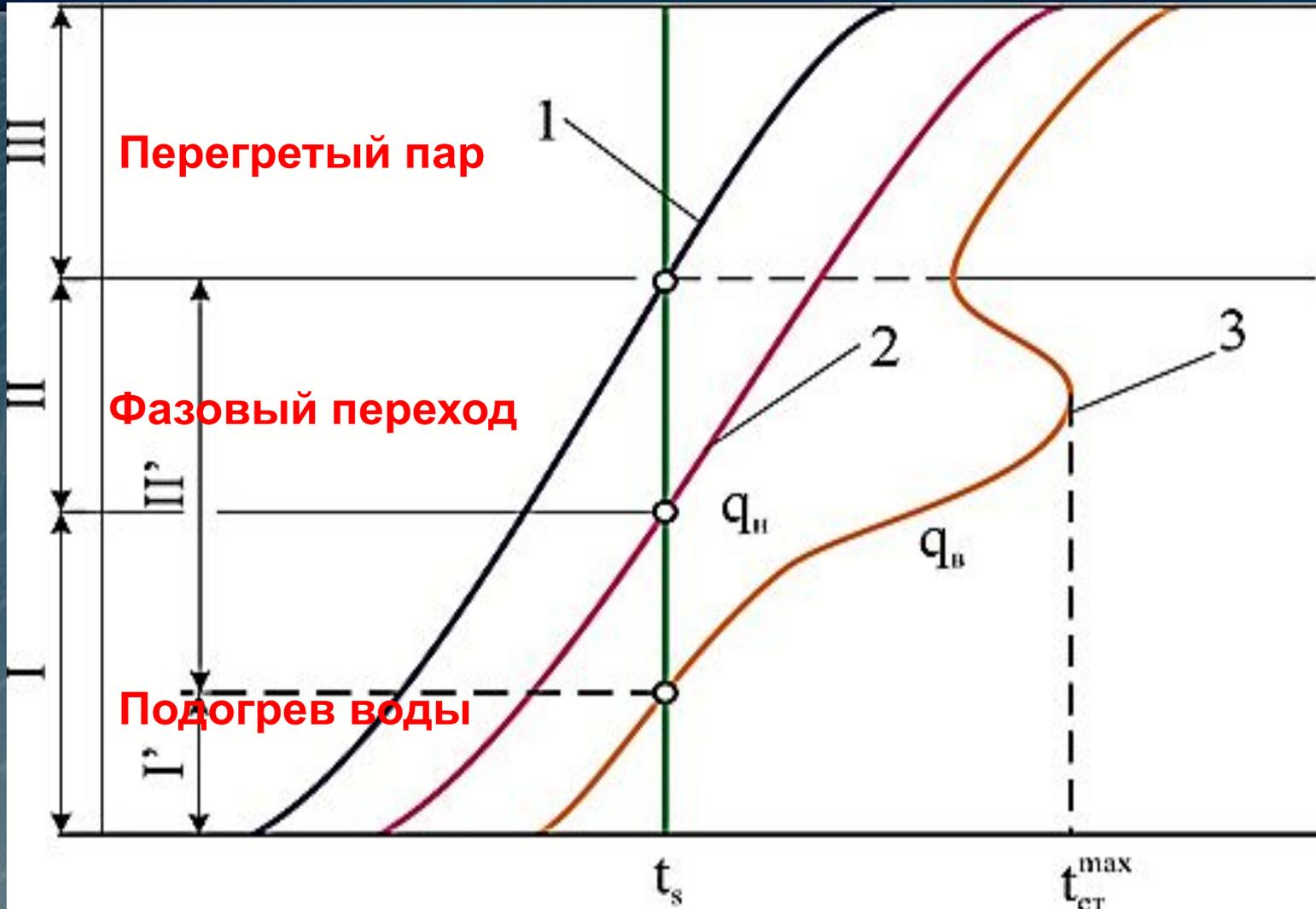
Кольцевой режим

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПВС В ТРАКТЕ КОТЛОВ ДОКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ



2 – температура потока; 3 – температура стенки барабанного котла с ЕЦ;
4 – температура стенки прямоточного котла; 5 – допустимая температура металла

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПВС В ТРАКТЕ КОТЛОВ СКД



1 – температура потока; 2 – температура металла при низких тепловых потоках;
3 – температура металла при высоких тепловых потоках

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ

В горизонтальных трубах характерна неравномерность распределения пара и воды в сечении трубы: *более легкий пар концентрируется у верхней образующей трубы, а вода – у нижней.*

Степень асимметрии потока зависит от скорости, диаметра трубы, величины давления. Чем выше скорость, тем меньше асимметрия

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ

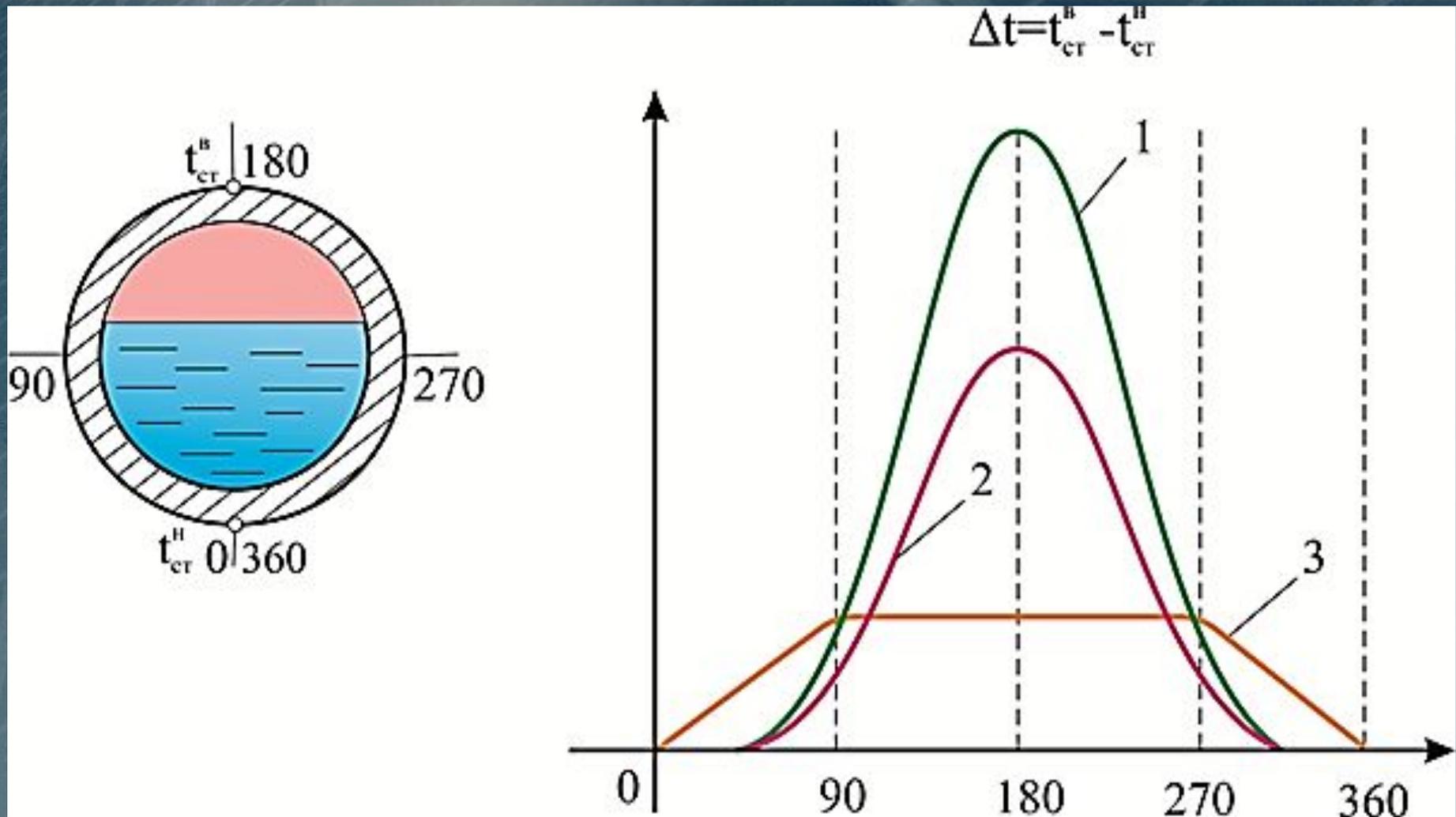
При скоростях входа воды в парогенерирующую трубу $w_0 > 1,0$ м/с и малом паросодержании образуются пузырьки пара, которые движутся вместе с водой *равномерно перемешанными*.

При $x > 50$ % у верхней образующей трубы скапливается поток пара, т. е. происходит *расслоение пароводяной смеси*.

При большом паросодержании потока ПВС течение в горизонтальной трубе приближается к *осесимметричному*, наблюдаемому в вертикальных трубах при дисперсно-кольцевом режиме течения.

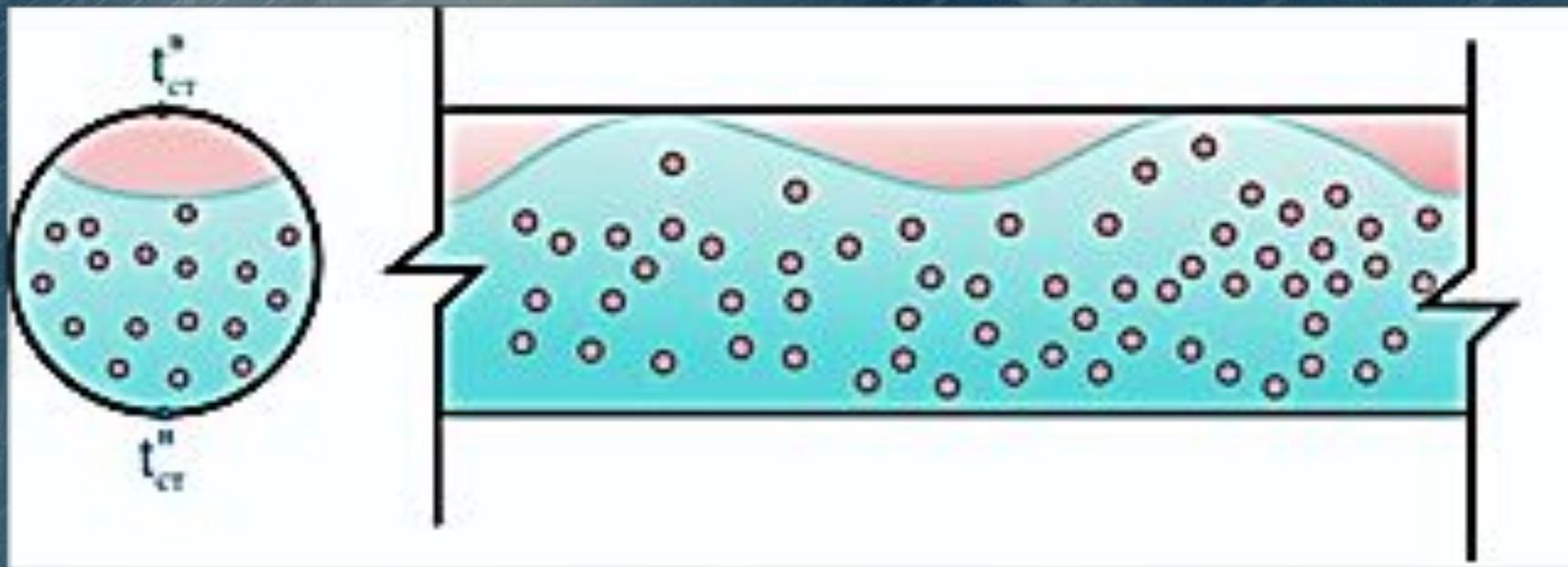
При малой скорости течения воды на входе в парогенерирующие трубы ($w_0 \leq 0,5$ м/с) асимметрия совместного движения воды и пара приводит к *оголению* значительных по радиусу участков трубы и расслоению пароводяной смеси

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ

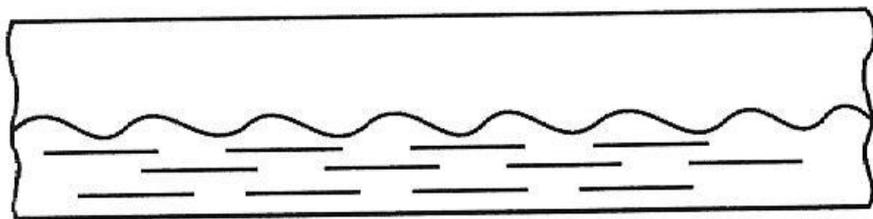


1 – $p = 11$ МПа; 2 – $p = 18$ МПа; 3 – $p = 22,4$ МПа

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ



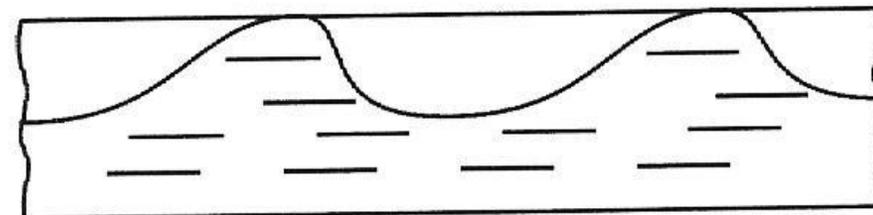
РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ



Слоистый

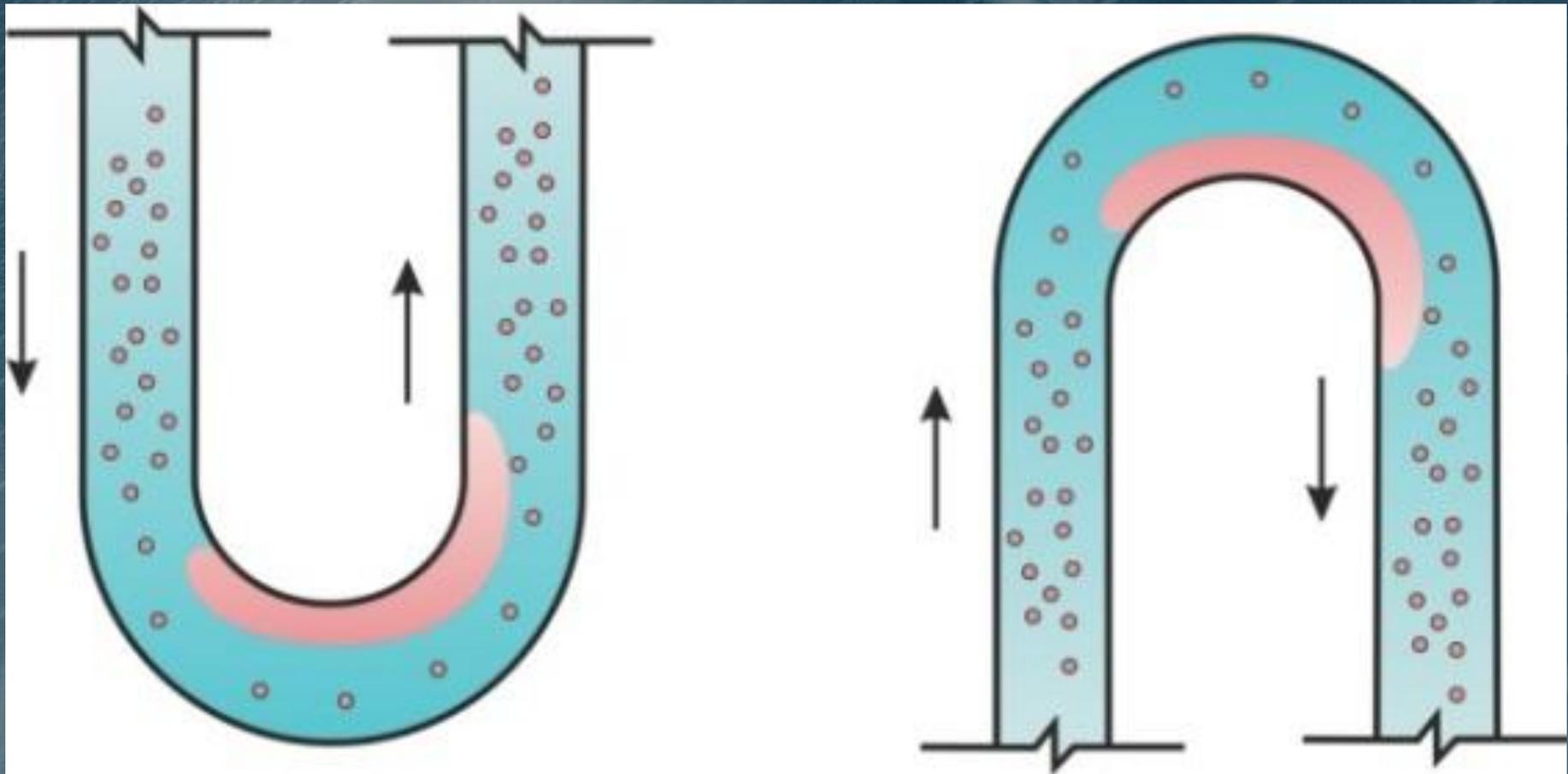


Волновой



Поршневой

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ГИБАХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА



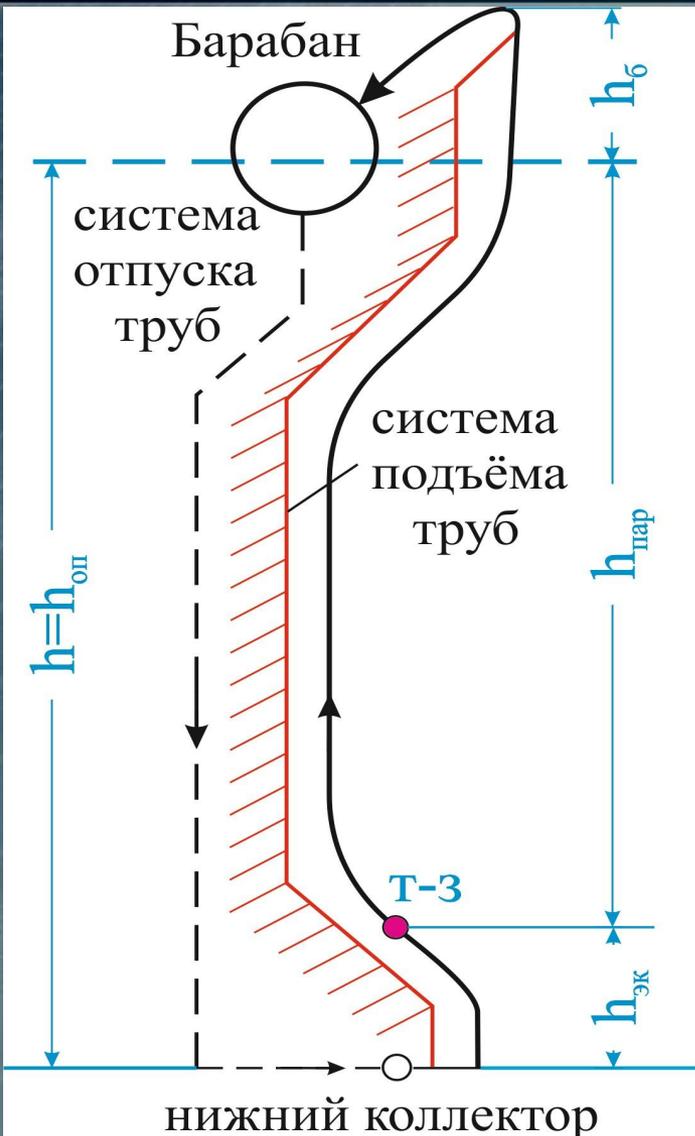
Возможно ухудшение омывания части трубы, связанное с центробежным эффектом забрасывания воды к наружной образующей трубы при повороте потока

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПВС В ГИБАХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Этот эффект наиболее сильно проявляется в котлоагрегатах с давлением ниже критического, т. е. во всех барабанных котлах

В прямоточных котлах одновременное существование двух фаз невозможно. Принято полагать, что эффект расслоения в этом случае маловероятен

ГИДРОДИНАМИКА ПАРОВЫХ КОТЛОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ



Движущий напор контура:

$$S_{дв} = h g (\rho' - \rho_{см})$$

Сопротивление трубной системы при установочном состоянии:

$$S_{дв} = \Sigma \Delta p_{под} + \Sigma \Delta p_{оп}$$

Полезный напор определяется:

$$S_{пол} = S_{дв} - \Sigma \Delta p_{под} = \Sigma \Delta p_{оп}$$

ГИДРОДИНАМИКА ПАРОВЫХ КОТЛОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Основное уравнение циркуляции:

$$S_{\text{пол}} = \sum \Delta p_{\text{оп}}$$

Полное сопротивление складывается из суммы **гидравлического, скоростного и нивелирного** сопротивлений (напоров):

$$\Delta p = \Delta p_{\text{гидр}} + \Delta p_{\text{ск}} \pm \Delta p_{\text{нив}} + \Delta p_h;$$

Для расчета контура циркуляции необходимо определить скорость циркуляции ПВС w_0 , при которой полезный напор $S_{\text{пол}} = \sum \Delta p_0$

МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНТУРОВ ЦИРКУЛЯЦИИ

РАСЧЕТ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА КОТЛА С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Уравнение $S_{\text{пол}} = \sum \Delta p_{\text{оп}}$ аналитически не решается, поскольку зависит от множества параметров

$$S_{\text{пол}} = f_1(\omega_0)$$

$$\Delta P_{\text{оп}} = f_2(\omega_0)$$

При увеличении w_0



Необходима специальная методика расчета

РАСЧЕТ ПРОСТОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА

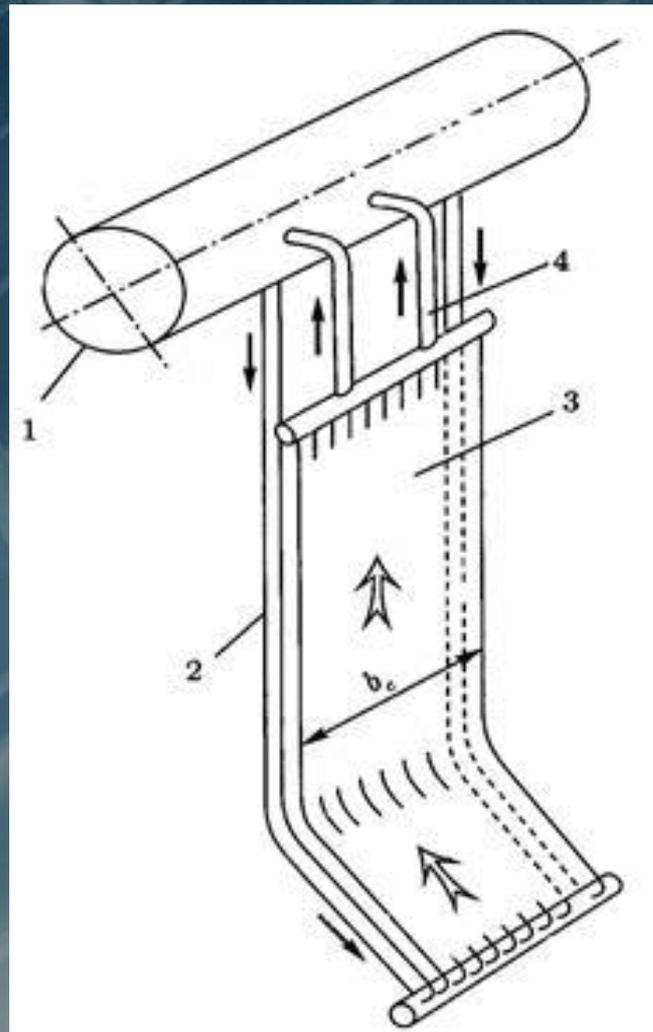
ПРОСТОЙ КОНТУР



все подъемные трубы имеют одинаковые геометрические (диаметр, длина, конфигурация) и тепловые характеристики



Одна из панелей топочного экрана (верхний и нижний коллекторы и 10–15 экранных труб)



РАСЧЕТ ПРОСТОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА

Методы решения:

1. **графоаналитический** метод
2. **итерационный** метод

РАСЧЕТ ПРОСТОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА

Графоаналитический



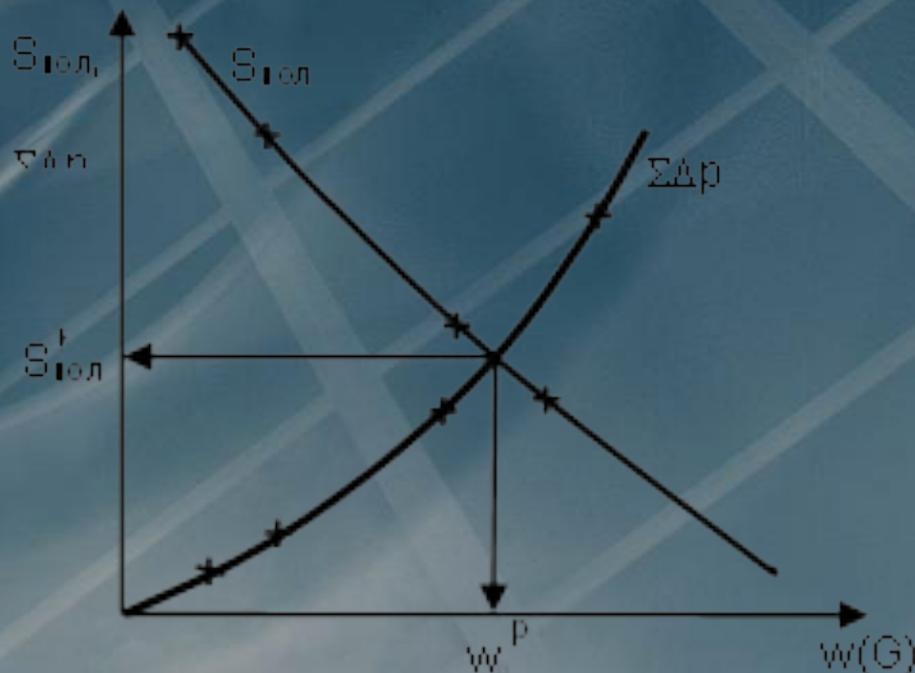
задают 3–4 значения w_{0i}



определяют полезный напор $S_{\text{пол}}$ и потери давления в опускных трубах $\Sigma\Delta p_{\text{оп}}$



по точкам строят зависимости



РАСЧЕТ ПРОСТОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА

Итерационный



Задаются минимально допустимым значением скорости циркуляции $0,2-0,3$ м/с и устанавливают шаг изменения скорости $0,05-0,1$ м/с.



На компьютере для каждого значения w_0 определяют $S_{\text{пол}}$ и потери давления $\sum \Delta p_{\text{оп}}$



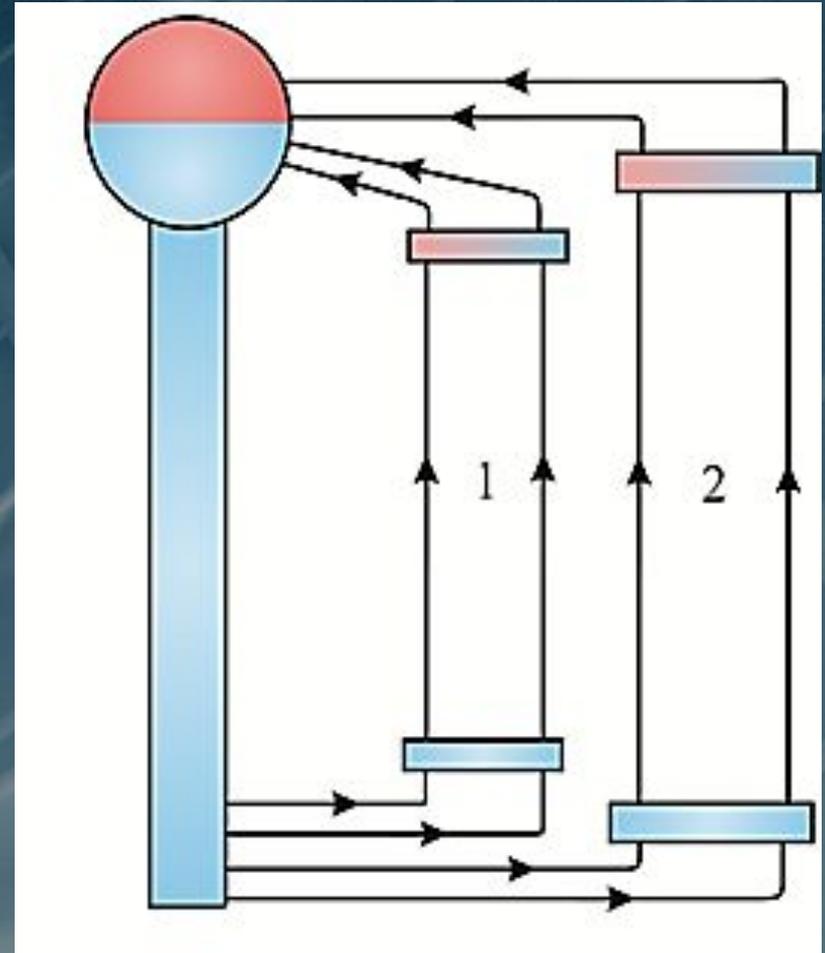
Находят оптимальны $S_{\text{пол}}$ и $\sum \Delta p_{\text{оп}}$ по заданной погрешности

РАСЧЕТ СЛОЖНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА

СЛОЖНЫЙ КОНТУР



все подъемные трубы имеют разные геометрические (диаметр, длина, конфигурация) и тепловые характеристики



РАСЧЕТ СЛОЖНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА

Сложный контур разбивается на ряд простых контуров



в параллельно включенных различных элементах контура суммируются расходы среды, а последовательно включенных — полезные напоры и гидравлическое сопротивление

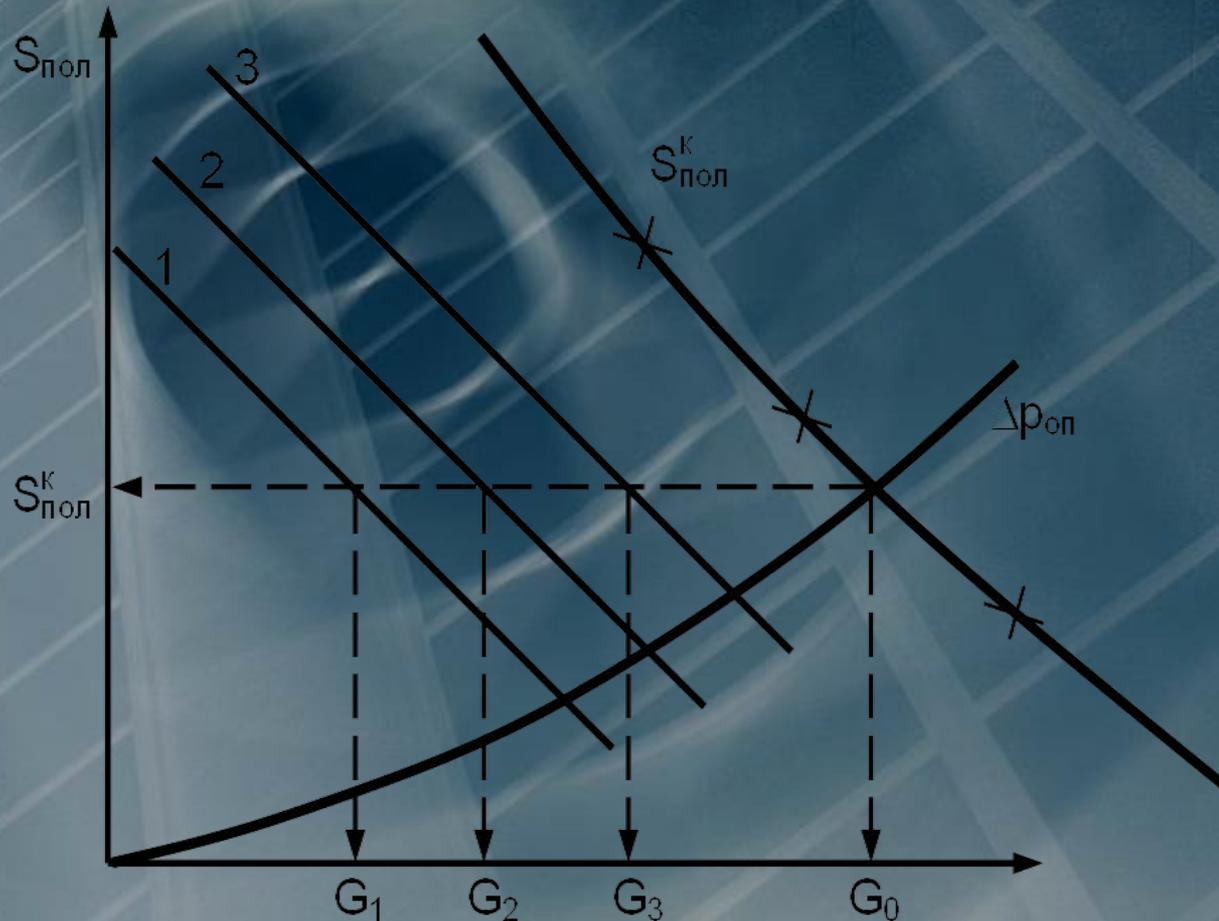


$$S_{\text{пол}}^{\text{к}} = S_{\text{пол1}} + S_{\text{пол2}} + S_{\text{пол3}}$$



$$G_0 = G_1 + G_2 + G_3$$

РАСЧЕТ СЛОЖНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА



НАДЕЖНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

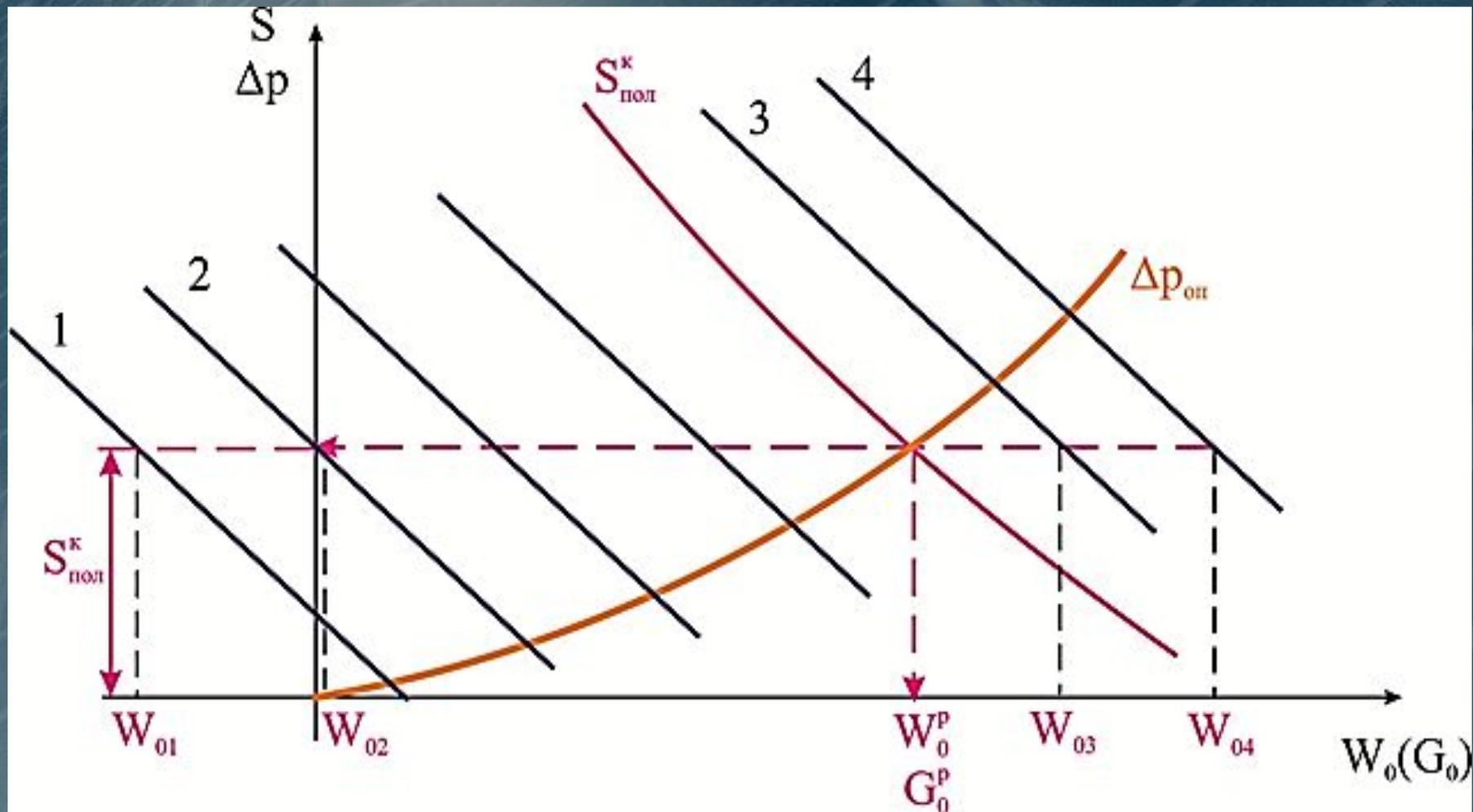
Расчет циркуляционного контура выполняют для **средних (расчетных)** условий работы, которые действительны большинства труб.

Но отдельные подъемные трубы или небольшая группа труб по ряду причин обогреваются слабее основной массы парогенерирующих труб и поэтому параметры циркуляции для них могут **сильно отличаться** от расчетных

Причин слабого обогрева:

- 1. затемненность от прямого излучения в местах разводки труб**
- 2. Шлакование**
- 3. угловое расположение труб**

НАДЕЖНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ



НАДЕЖНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Проверку надежности проводят:

1. на обеспечение нормального теплообмена для обогреваемых труб (неравномерное распределение тепловых потоков, расслоение пароводяной смеси);
2. образование свободного уровня, застоя и опрокидывания циркуляции;
3. неустойчивый режим опускной системы;
4. надежность циркуляции при нестационарных режимах.

НАДЕЖНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Свободный уровень наблюдается при скорости циркуляции близкой к нулю. В этом случае подъемная труба заполняется до некоторого уровня практически неподвижной водой, выше данного уровня находится пар. Колебание уровня приводит к образованию накипи на границе раздела и резкому изменению температуры стенки трубы.

Застой циркуляции наблюдается при скорости циркуляции близкой к нулю. В данном случае пузыри пара всплывают в практически неподвижной котловой воде и могут образовывать большие скопления в сварных швах и других местных сопротивлениях. В местах скопления пузырьков пара, повышается температура стенки, что увеличивает вероятность разрыва труб.

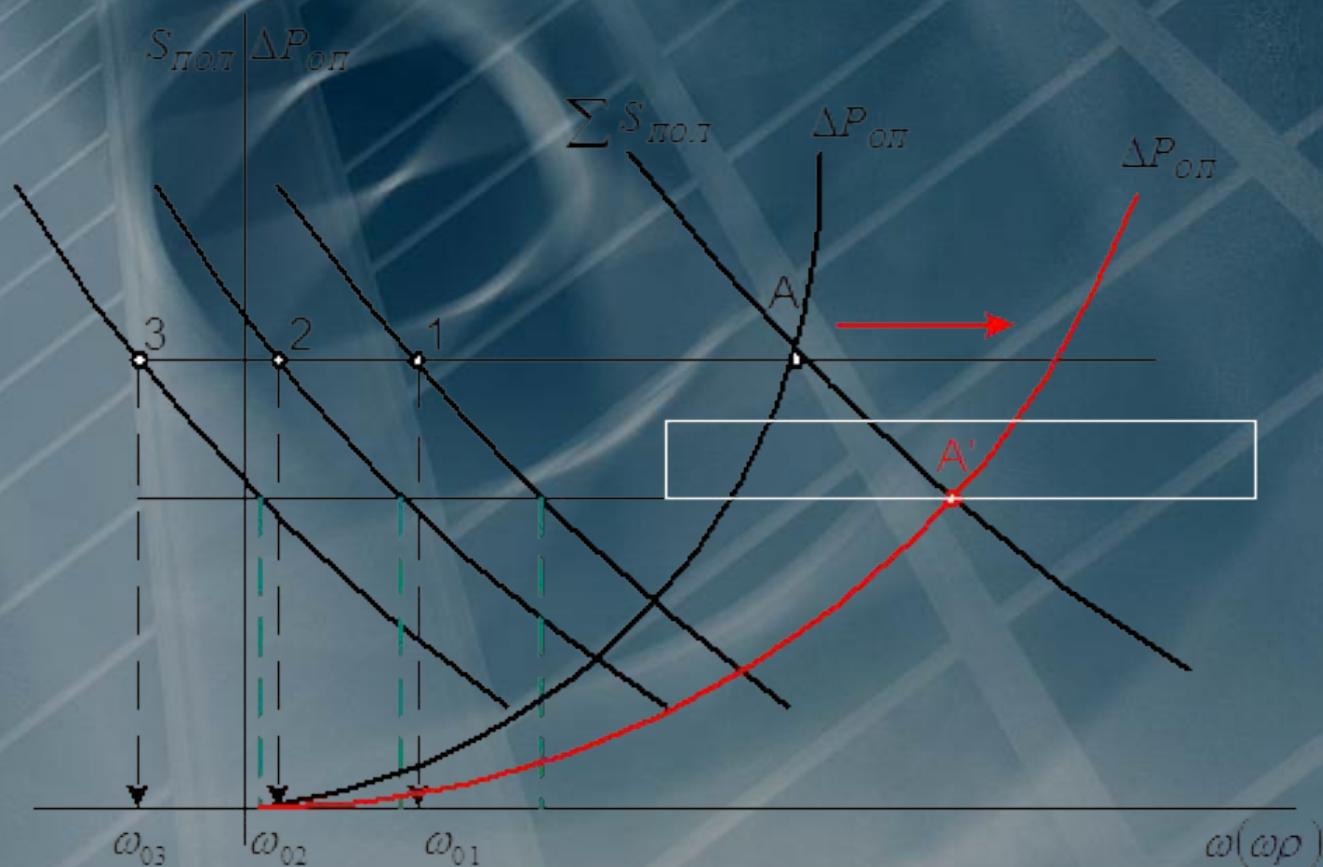
НАДЕЖНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Опрокидывание циркуляции возникает для слабообогреваемых подъемных труб, включенных в водяной объем барабана, для которых может изменяться направление движения потока ($w_0 < 0$). Данный режим наблюдается для контура циркуляции, имеющего общую систему опускных труб и подъёмных труб с резко отличающимися тепловыми характеристиками. При этом, вода в слабо обогреваемых трубах может двигаться вниз, а пузырьки пара – вверх и могут образовывать большие скопления в сварных швах и других местных сопротивлениях. В местах скопления пузырьков пара, повышается температура стенки, что увеличивает вероятность разрыва труб.

НАДЕЖНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Методы повышения надежности циркуляции:

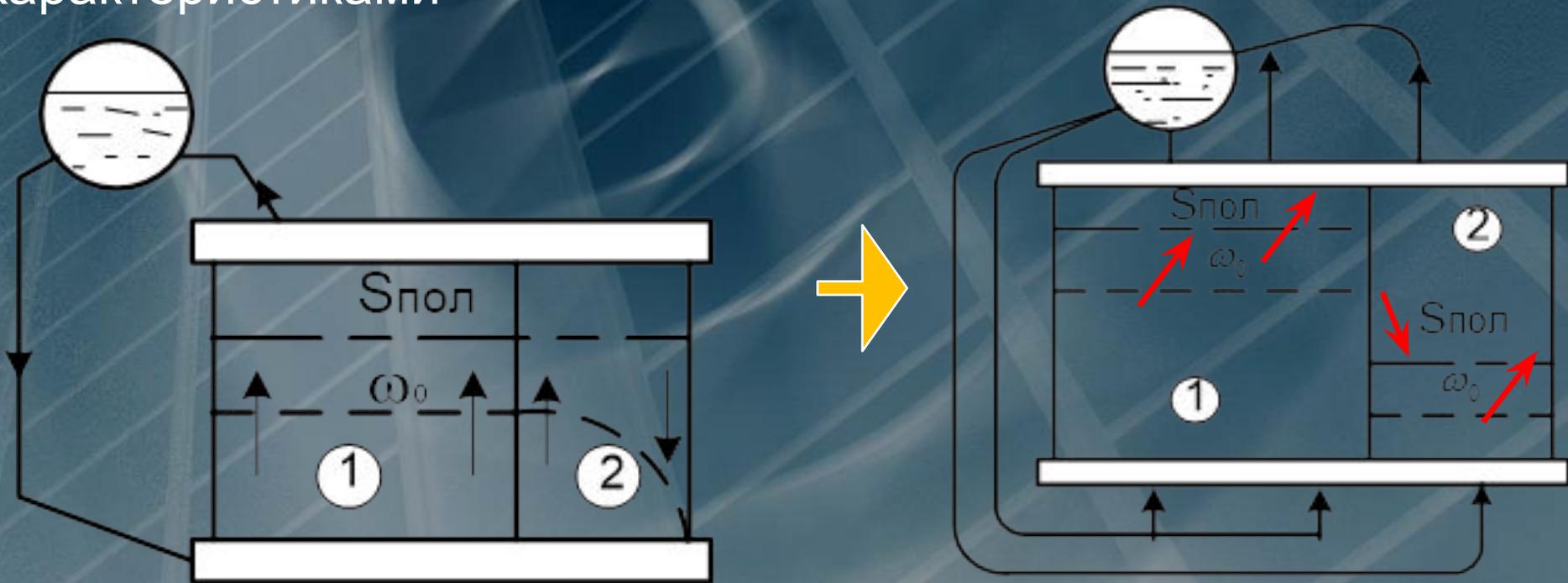
1) Снижение сопротивления опускных труб



НАДЕЖНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Методы повышения надежности циркуляции:

2) Секционирование топочного экрана с включением в каждую секцию труб с близкими тепловыми и гидравлическими характеристиками



1 - хорошо обогреваемые подъемные трубы; 2 - слабо обогреваемые подъемные трубы

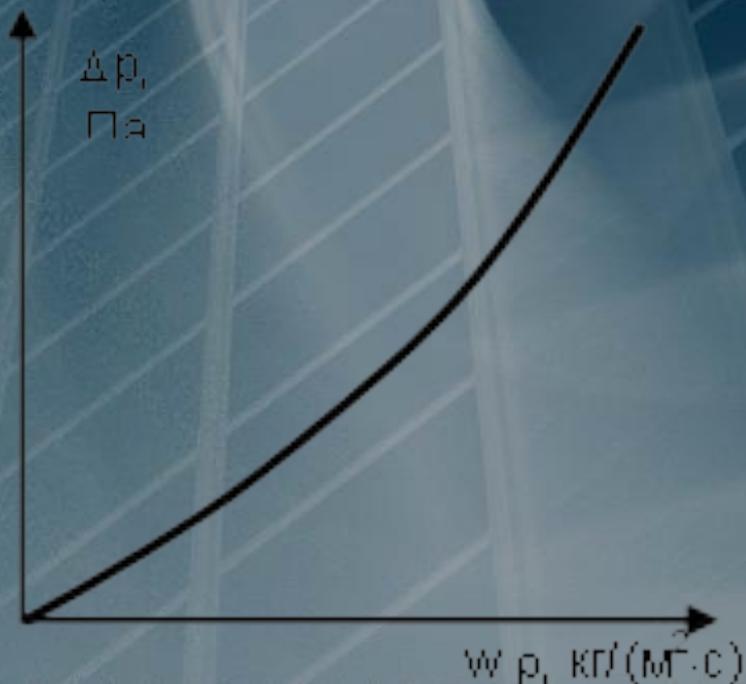
ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПОТОКА

Гидравлическая (или гидродинамическая)
характеристика - зависимость гидравлического
сопротивления от расхода рабочей среды через трубу

$$\Delta p_{\text{тр}} = f(w \rho)$$

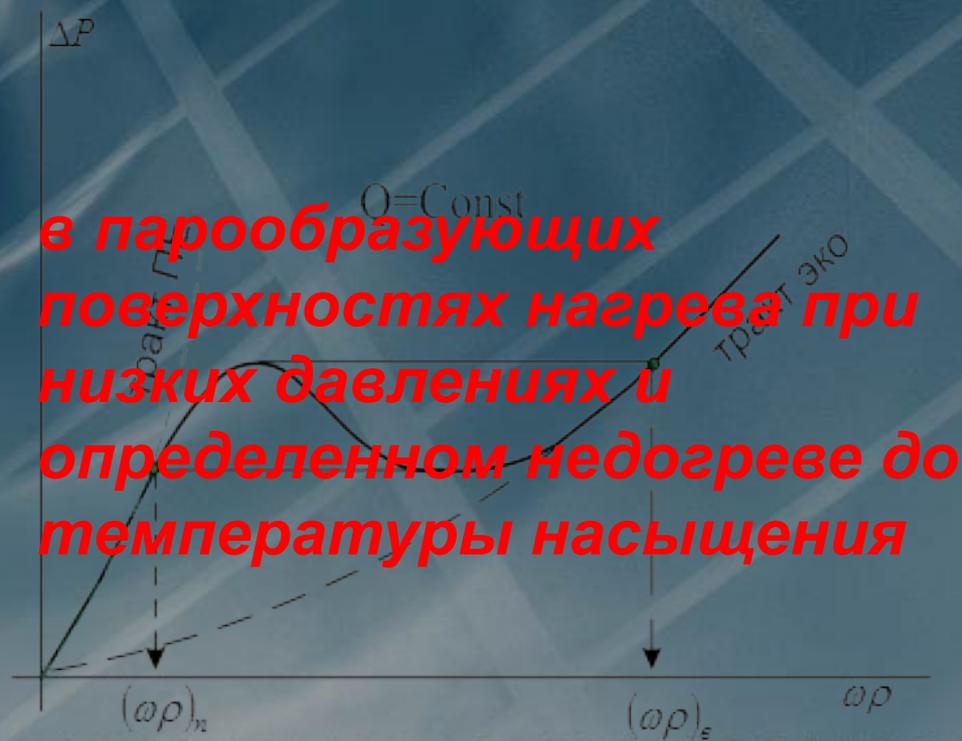
ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

**Однозначная
гидродинамическая
характеристика**



**Многозначная
гидродинамическая
характеристика**

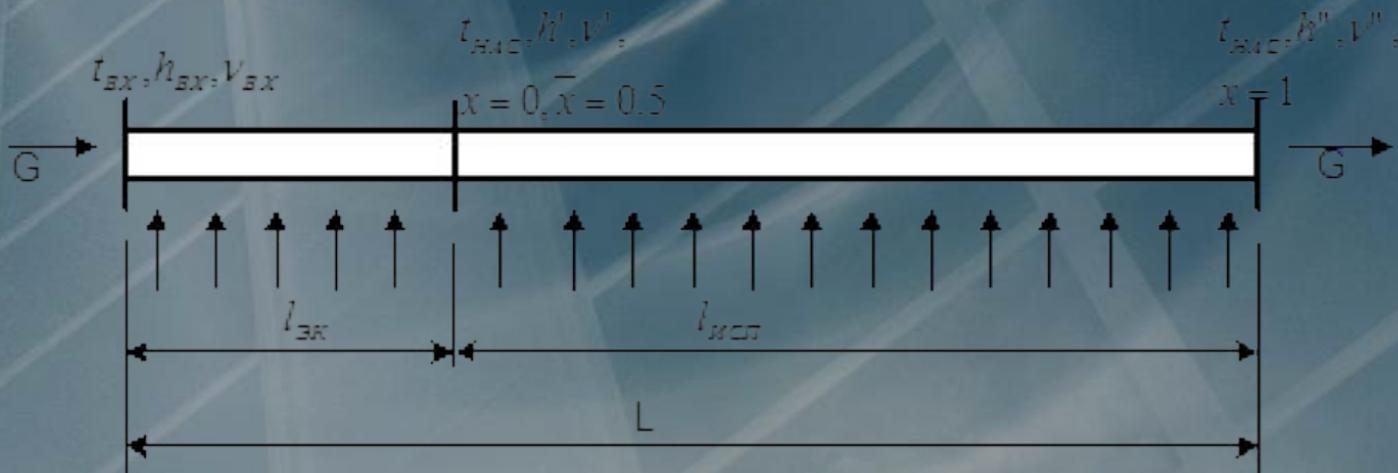
(какому-то сопротивлению соответствует два и более расходов)



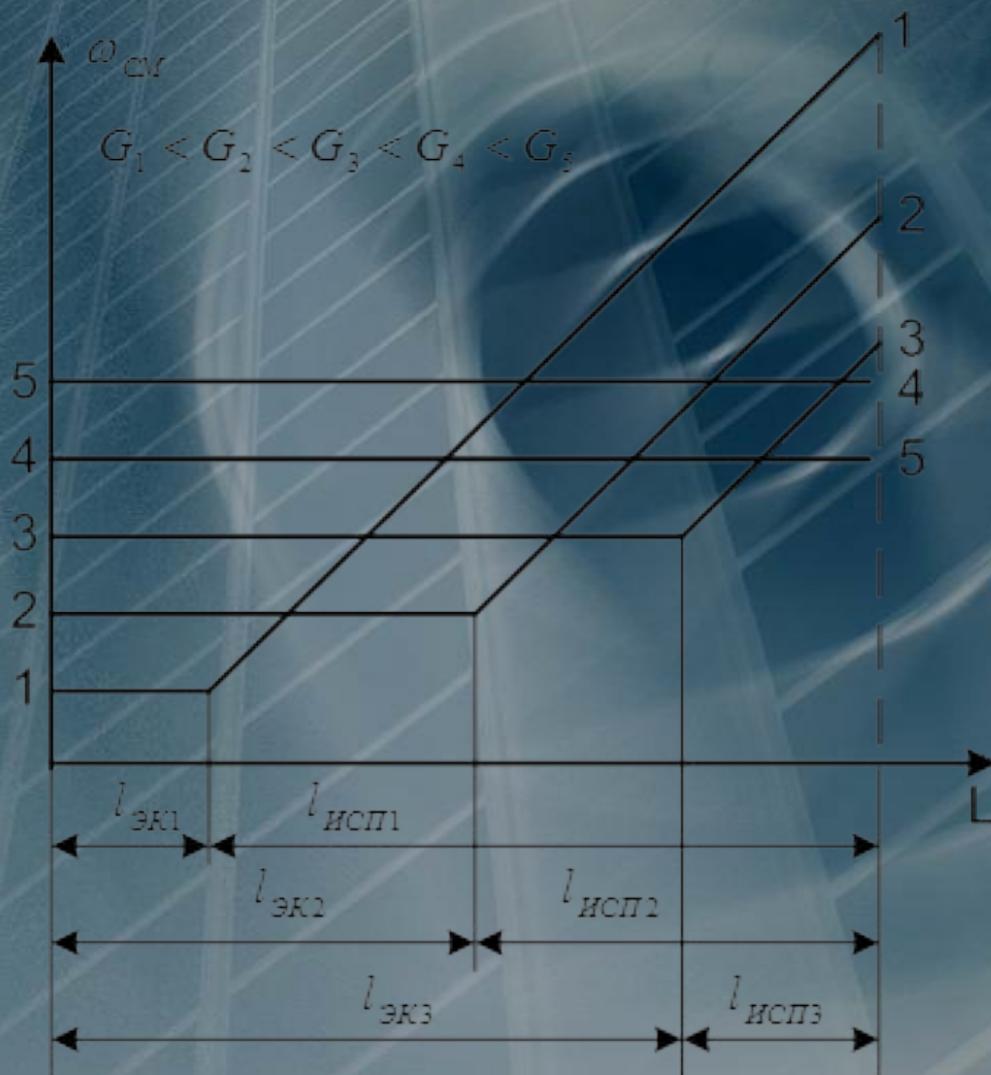
ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Определяющим фактором, влияющим на устойчивость характеристики, является температура среды на входе в элемент. Неустойчивое движение температура на входе меньше температуры насыщения.

В этом случае, паробразующая труба по длине разбивается на **экономайзерный** и **испарительный** участки.



ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

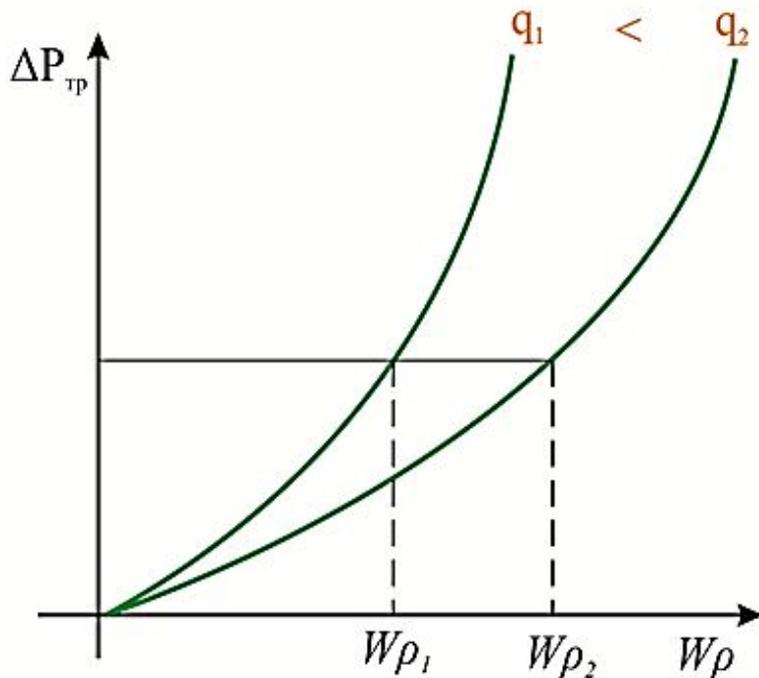


Увеличение расхода воды, недогретой до температуры насыщения вызывает увеличение сопротивления экономайзерного участка и снижение испарительного участка

В зависимости от сочетания сопротивлений этих участков, суммарное сопротивление тракта может увеличиваться или уменьшаться с ростом расхода в определенном диапазоне расходов.

ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Многозначная гидродинамическая характеристика



Кривая 1:

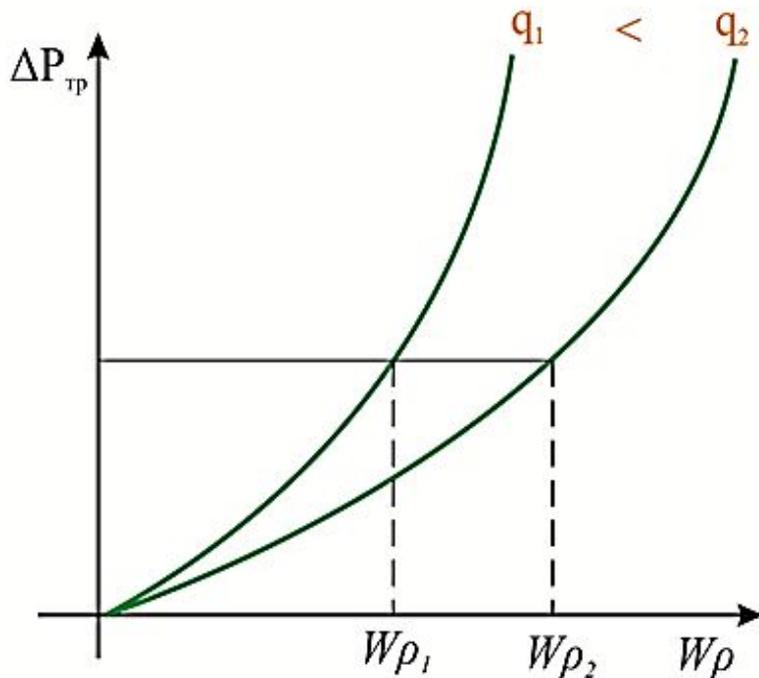
- малый расход воды
- образование перегретого пара
- объём пара в 50-100 раз превышает объём воды, что вызывает резкое увеличение скорости пара
- с ростом скорости возрастает сопротивление



пароперегреватель

ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Многозначная гидродинамическая характеристика



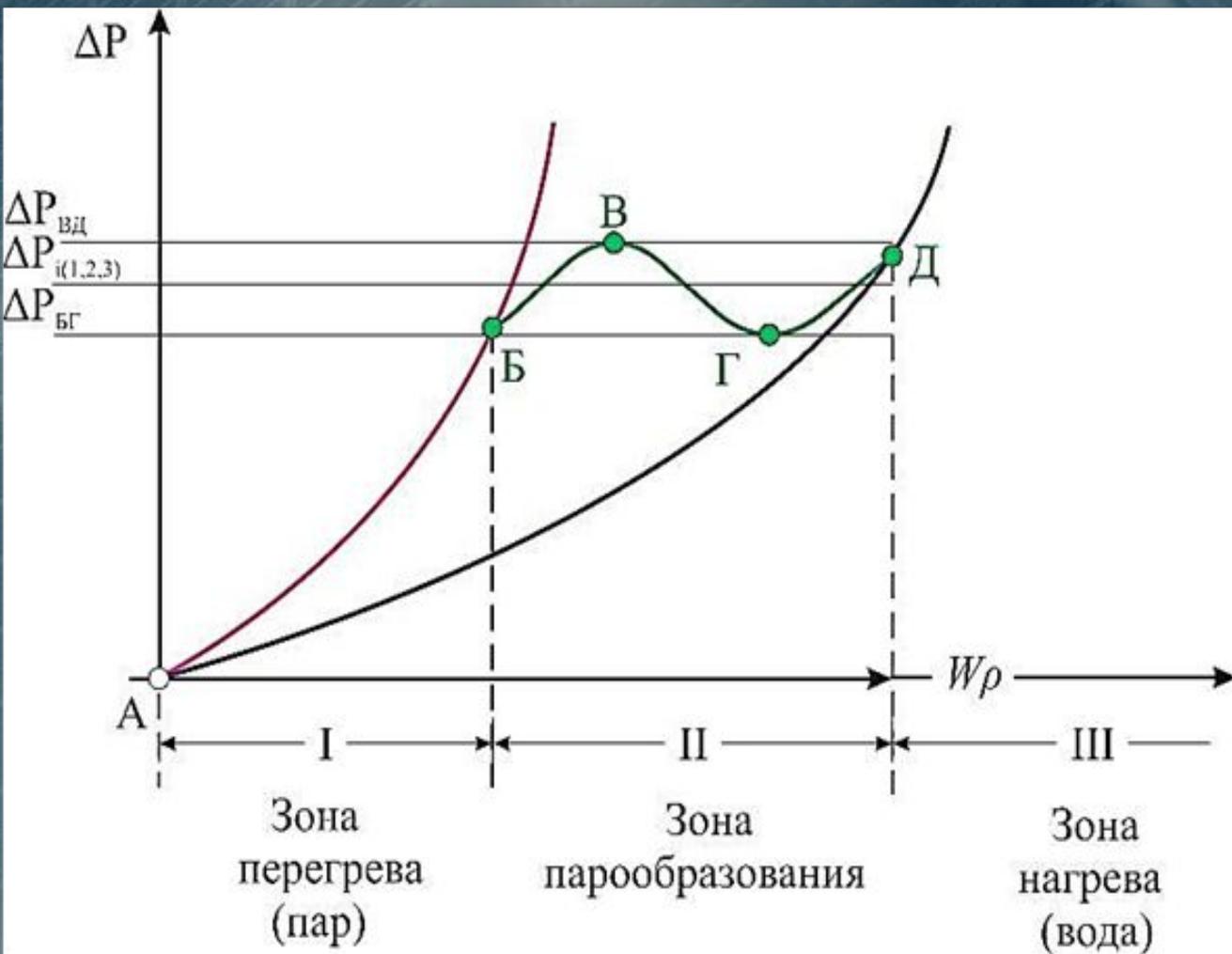
Кривая 2:

- большой расход воды
- вода не догревается до насыщения, нет образования пара
- скорость движения воды небольшая
- сопротивление ниже чем для пара



экономайзер

ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ



кривая Б-В-Г-Д
нестабильная характеристика, вызванная образованием в тракте пароводяной смеси

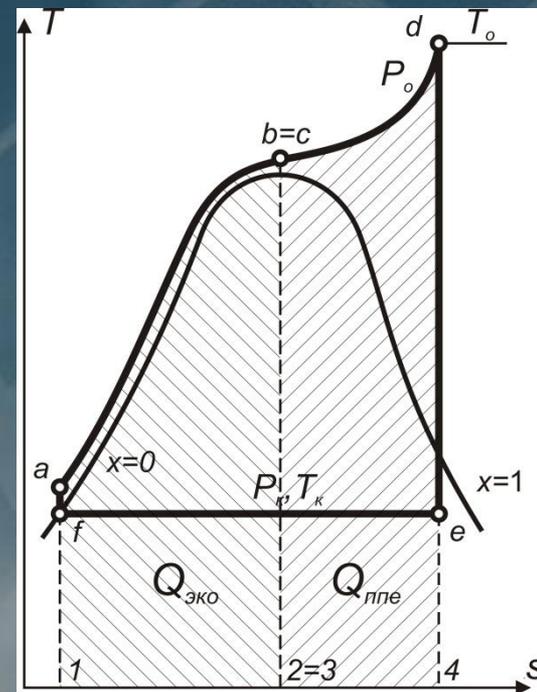
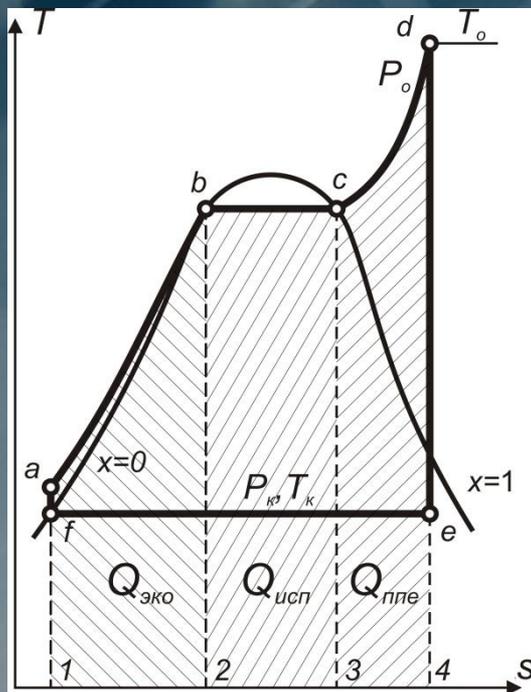
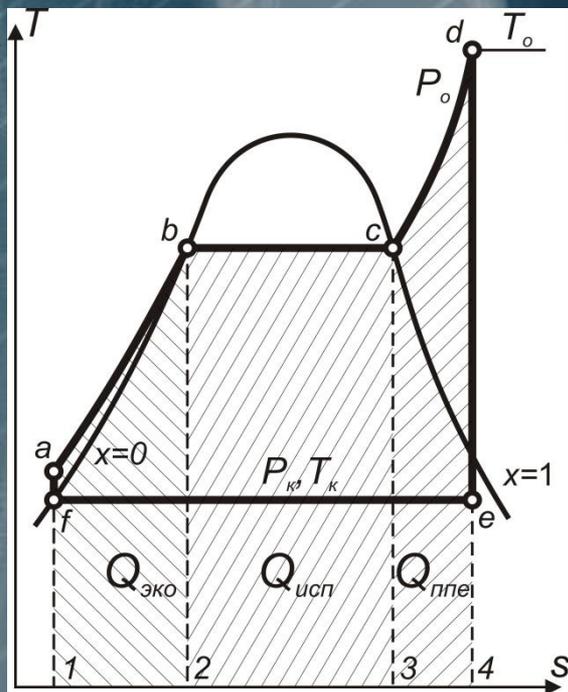


- Изменение расхода ПВС
- Изменение паросодержания ПВС

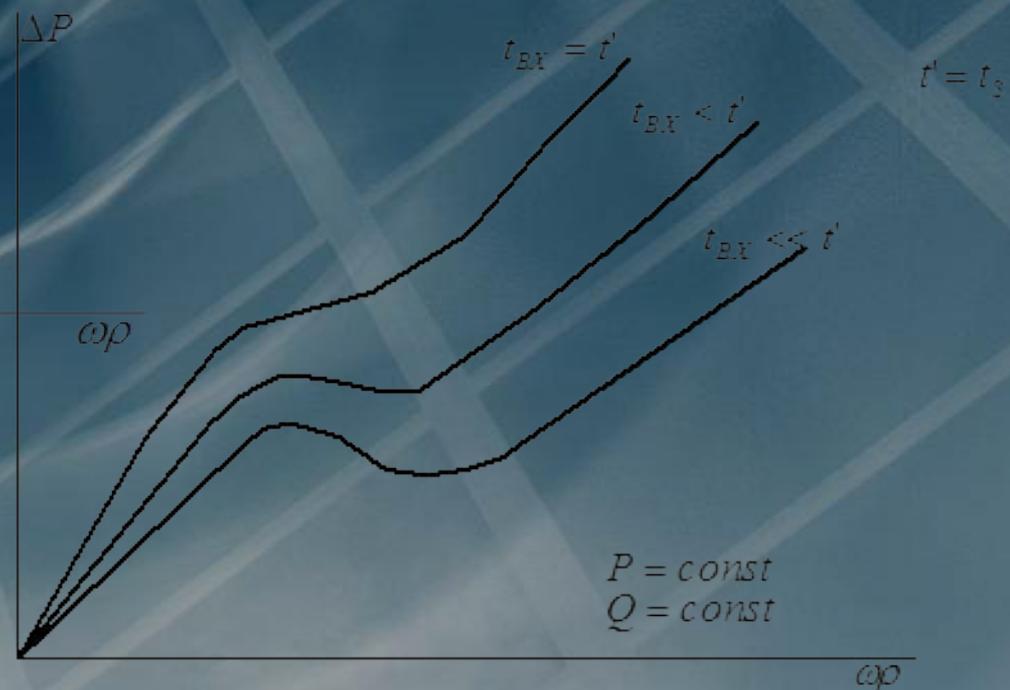
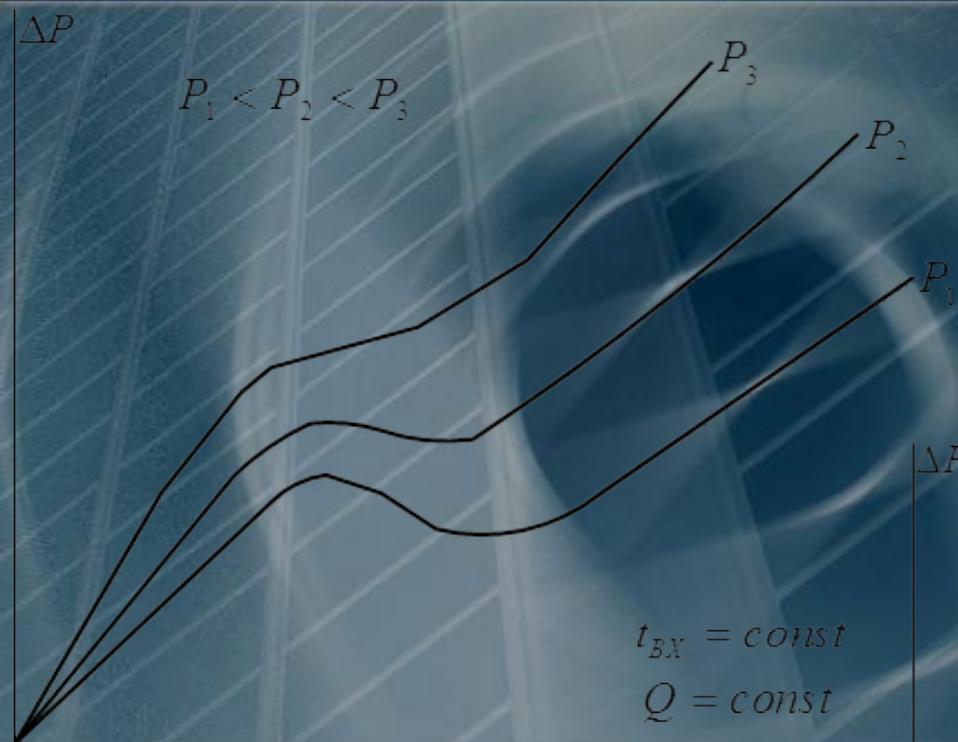
ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Основная причина многозначности - **большая разность удельных объемов пара и воды**

Данный эффект снижается при **увеличении давления**



ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ



ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Неоднозначность характеристики имеет место и при СКД, если энтальпия на входе меньше или много меньше энтальпии фазового перехода

ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Однако, повышение температуры на входе до температуры насыщения опасно появлением пароводяной смеси на входе в парообразующие панели в некоторых режимах. Это может привести к сепарации воды в входном коллекторе и к резкой неравномерности раздачи рабочего тела по параллельно работающим трубам, что вызывает аварийные ситуации. Поэтому *экономайзеры котлов ВД и СВД, всех прямоточных котлов во всех режимах должны быть некипящими.*

ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Как увеличить давление воды в поверхности нагрева?

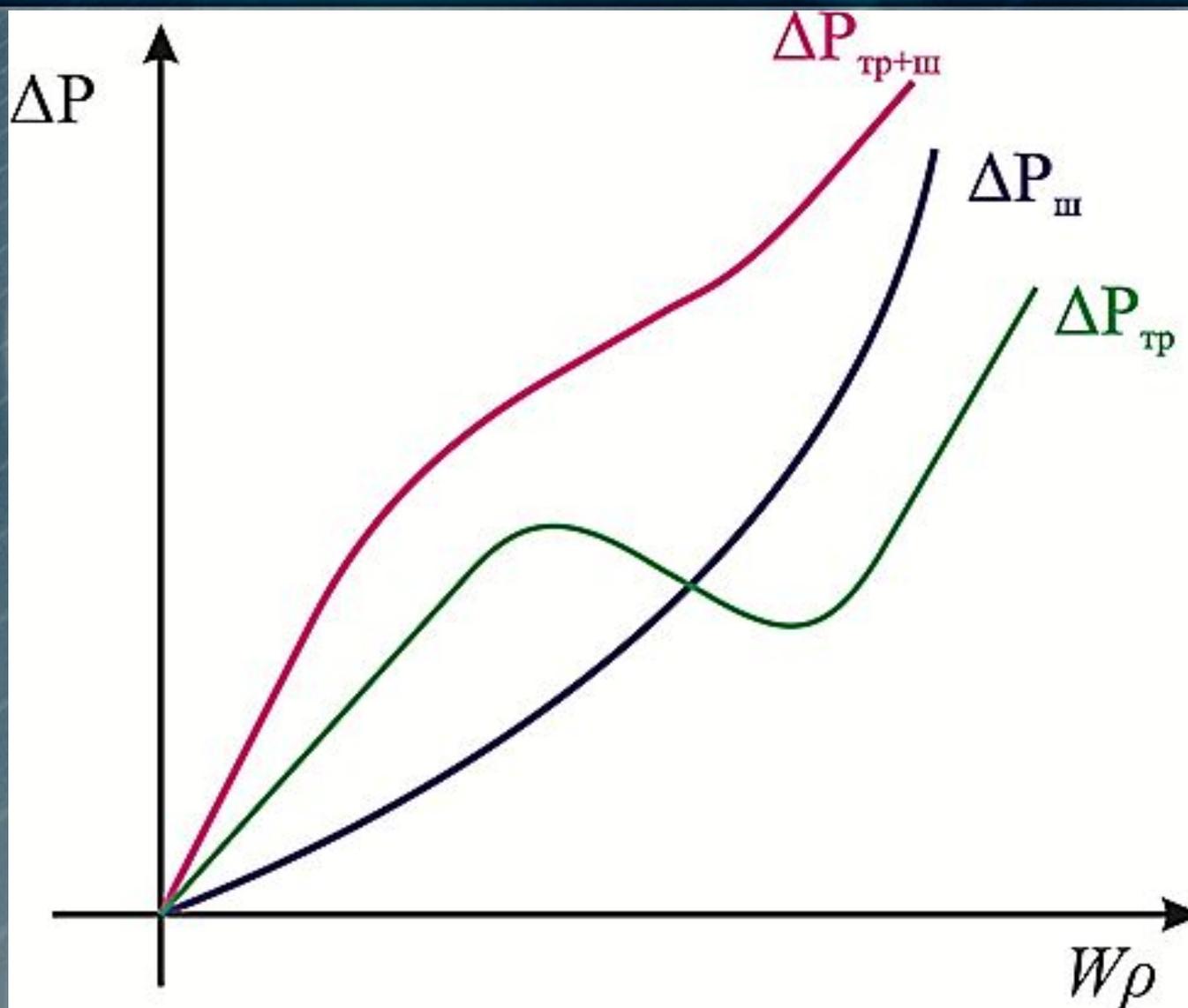


Увеличивается сопротивление участка трубопровода путем его шайбования (установки шайбы с меньшим диаметром отверстия в ней, чем диаметр трубы)



Выравнивание гидравлической характеристики

ГИДРОДИНАМИКА КОНТУРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ



КОЛЛЕКТОРНЫЙ ЭФФЕКТ

Влияние схемы включения коллекторов на равномерность распределения рабочей среды по параллельно включенным трубам

КОЛЛЕКТОРНЫЙ ЭФФЕКТ

Коллекторы разделяются на:

**-ВХОДНЫЕ
(распределительные)**

*предназначены для
распределения или
раздачи среды по
параллельным трубам*

-ВЫХОДНЫЕ (собирающие)

*собирают рабочее тело и
выводят в следующий
элемент*

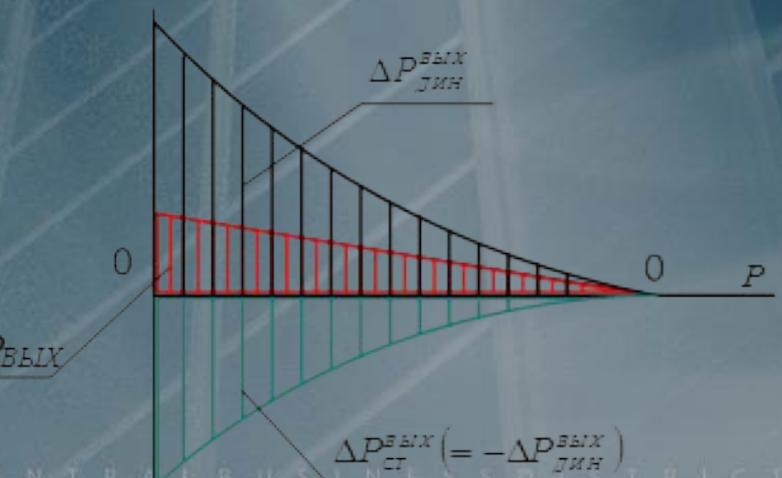
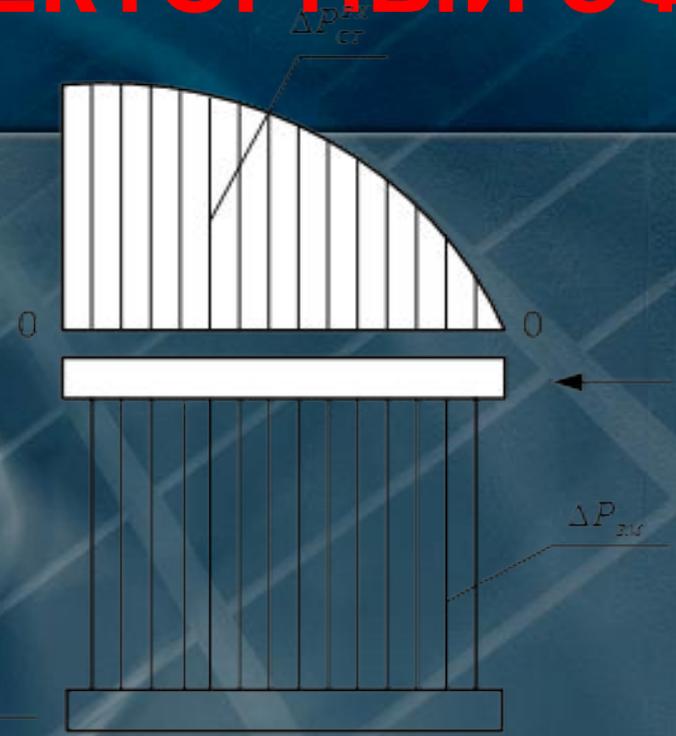
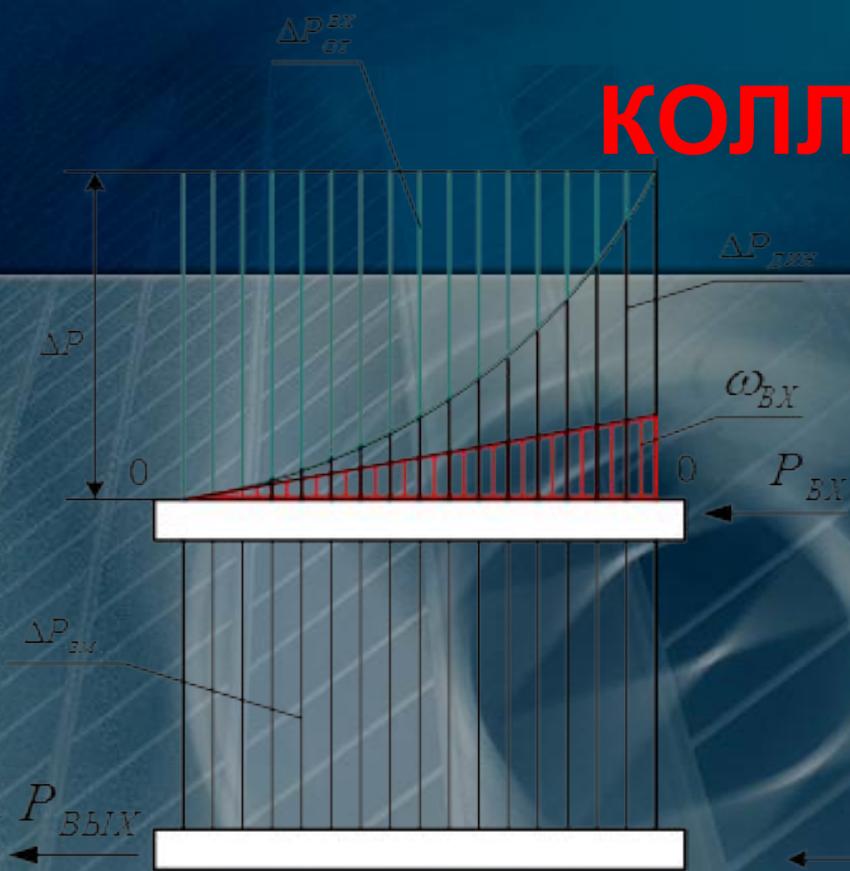
**-промежуточные
(смесительные) коллекторы,
которые.**

*Стабилизируют работу
параллельных элементов,
т.е. выравнивают
температуры пара по па-
раллельным змеевикам*

КОЛЛЕКТОРНЫЙ ЭФФЕКТ

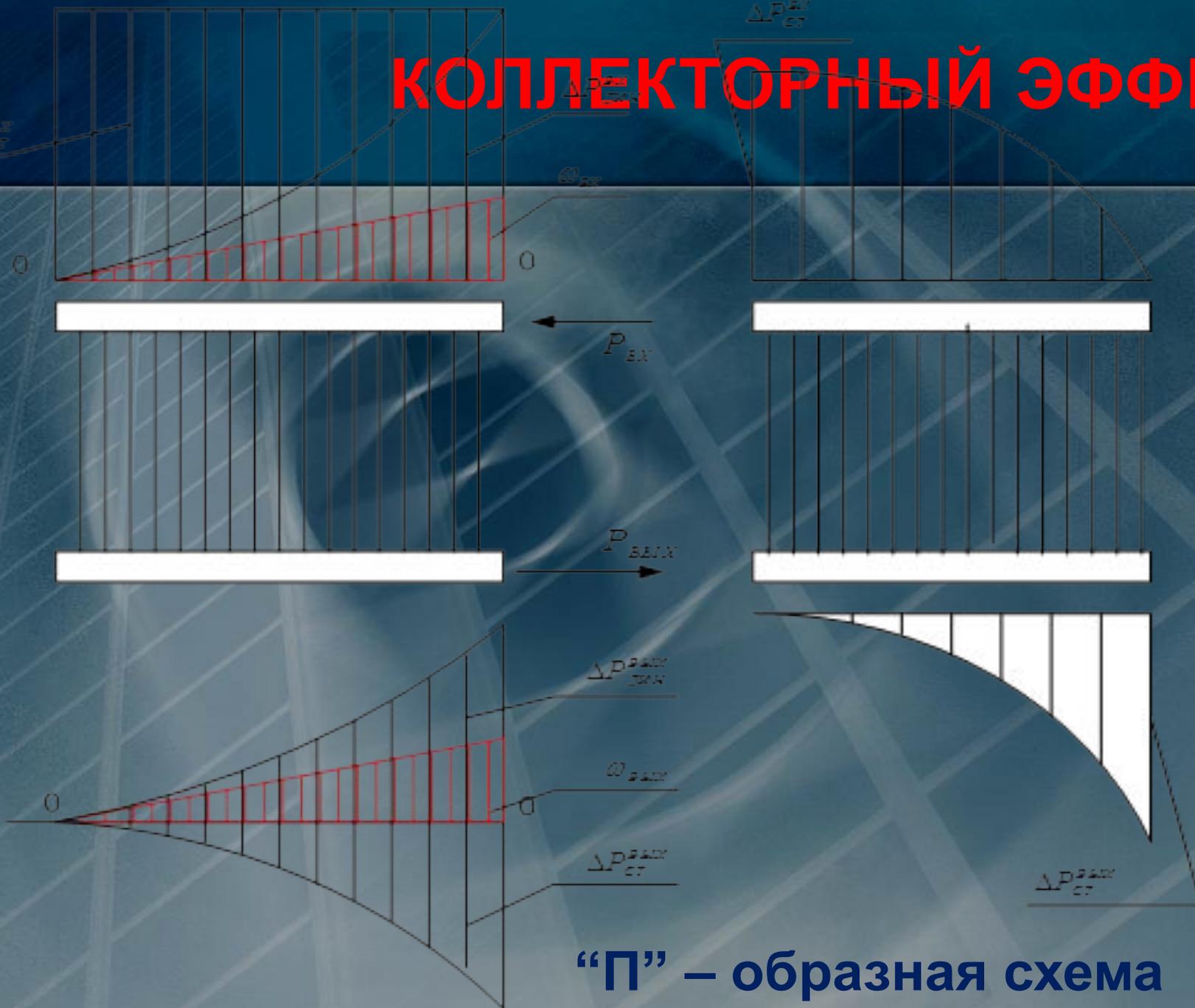


КОЛЛЕКТОРНЫЙ ЭФФЕКТ



“Z” – образная схема

КОЛЛЕКТОРНЫЙ ЭФФЕКТ



“П” – образная схема

ПУЛЬСАЦИИ ПОТОКА

