

СЭТБАЕВ
УНИВЕРСИТЕТИ



SATBAYEV
UNIVERSITY

Теплогидравлическая разверка параллельно включенных труб. Расчётное определение коэффициентов разверки

Преподаватель: Кафедра «Энергетики», PhD доктор,
ассоциированный профессор Онгар Булбул

b.ongar@satbayev.university

Введение

- 1 Тепловая развязка;
- 2 Тепловые и гидродинамические условия работы экономайзеров;
- 3 Тепловые и гидродинамические условия работы пароперегревателей;
- 4 Межвитковая (межтрубная) пульсация;
- 5 Гидродинамическая неустойчивость;
- 6 Общая пульсация расходов;
- 7 Тепловые и гидродинамические условия работы испарительных поверхностей;
- 8 Тепловые условия работы прямоточного испарителя;
- 9 Условия работы испарительных поверхностей ПГ с естественной циркуляцией.

Тепловая разверка

Режимы работы отдельных труб могут быть существенно различными. Отклонения действительных режимов работы трубок от средних характеризуются приращением энтальпии рабочего тела в каждой из параллельно включенных трубок: $\Delta h_i = q_i S_i / D_i$

Приращение энтальпии теплоносителя для трубки, работающей в средних условиях: $\Delta h_{cp} = q_{cp} S_{cp} / D_{cp}$, [Дж/кг]

Условия работы трубок различны, поэтому возможны случаи:

$$\Delta h_i = \Delta h_{cp}; \quad \Delta h_i < \Delta h_{cp}; \quad \Delta h_i > \Delta h_{cp}$$

При $\Delta h_i > \Delta h_{cp}$ возможен переход в режим работы с ухудшенным теплообменом или рост $t > t_{ct}^{доп}$

Нетождественность трубок поверхности теплообмена в отношении приращения энтальпии среды называют тепловой разверкой:

$$\eta = \Delta h_i / \Delta h_{cp} \text{ или}$$

$$\eta = \frac{q_{тр}}{q_{cp}} \cdot \left(\frac{D_{тр}}{D_{cp}} \right)^{-1} \cdot \frac{S_{тр}}{S_{cp}}$$

конструкционная неравномерность $\eta_T = S_i / S_{cp}$

тепловая неравномерность $\eta_T = q_i / q_{cp}$

гидравлическая неравномерность $\eta_T = D_i / D_{cp}$

Условия отсутствия тепловой разверки:

$\eta_T = \eta_T$ - во всех трубках,

$\eta_T = 1$, $\eta_T = 1$ - во всех трубках

что неосуществимо

Тепловая разверка

Для ПГ АЭС наибольшее значение имеет **гидравлическая неравномерность**, которая в основном определяется факторами конструкционного характера, а также физико-химическими процессами (отложения примесей, коррозия).

Расходы через отдельную трубку зависят прежде всего от гидравлических сопротивлений. Их расхождение для отдельных элементов обуславливается разницей суммы местных сопротивлений, неодинаковой шероховатостью, различием диаметров.

Тепловая неравномерность при правильном конструировании незначительна для большинства ПГ АЭС, кроме ПГ с U-образными трубками.

Тепловая неравномерность тесно связана с гидравлической.

Методы предотвращения разверки. Основной путь - искусственное изменение гидравлического сопротивления труб. На входных и выходных участках устанавливают дроссельные шайбы (вставки с малым проходным сечением)

- индивидуальное шайбование - в каждую трубу устанавливают шайбы со "своим" сопротивлением – что дорого

- уравнильное (во все трубки шайбы с одинаковым сопротивлением) - проще.

При этом не стремятся получить $\eta = 1$, но $\eta_T < \eta_{\text{доп}}$;

$\eta_{\text{доп}} = (\Delta h_i)_{\text{max}} / \Delta h_{\text{ср}}$ - зависит от назначения ПТО, температуры теплоносителя, допустимой температуры стенки, условий перехода к ухудшенным режимам теплоотдачи

Тепловые и гидродинамические условия работы экономайзеров

Наиболее легкие условия работы (t мин)

Желательно восходящее движение р.т. (отвод газов и пара)

Оптимальные скорости 1 - 3 м/с (при низких скоростях - задержка газ. пузырей) и рост a_2 (до 5000 Вт/(м² К))

Допустимая тепловая разверка - из условия предотвращения образования отложений примесей. $\eta_{\text{доп}} = 2.5 - 4.5$ (зависит от параметров р.т.)

Факторы, снижающие надежность работы ЭКО:

- коррозия при неправильном ВХР,
- возможность пульсаций термических напряжений.

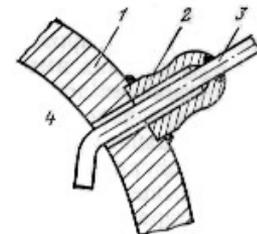
Причина пульсаций – колебания расхода и температуры питательной воды (при нарушениях работы регенеративной схемы - ПВД, ПНД).

Рост расхода ведет к $\downarrow t_{\text{ст}}$ и наоборот.

Особая опасность - для сварных швов подключения труб к толстостенным элементам (корпус ПГ, коллектор, барабан)

Узел ввода воды должен иметь защитное устройство

(например, паровая рубашка)



Тепловые и гидродинамические условия работы пароперегревателей

Наиболее тяжелые условия работы (высокие t т/носителя и р.т., высокие плотности тепловых потоков, относительной низкий a)

Для низкотемпературных ПП ($t''_1 < 500^\circ\text{C}$, $t''_2 < 450^\circ\text{C}$) нет опасности пережога трубок, т.к. всегда $t_{\text{ст}} < t^{\text{доп}}_{\text{ст}}$.

Факторы, снижающие надежность работы низкотемпературных ПП:

- вибрация трубок,
- отложения примесей, унесенных паром,
- циклические смещения границ зоны досушки пара до $x=1$.

При правильном конструктивном решении и эксплуатации влияние этих факторов незначительно (ни отложений, ни коррозии практически нет)

Если ПП из углеродистой стали ($t^{\text{доп}}_{\text{ст}} = 470^\circ\text{C}$) - $\eta_{\text{доп}} = 16\%$. Значение $\eta_{\text{доп}}$ м. б. большим при использовании легированной стали.

Для высокотемпературных ПП $\eta_{\text{доп}}$ ограничивается $t^{\text{доп}}_{\text{ст}}$, которая зависит от тепловых потоков (различаются для разных видов теплоносителей)

В ПП высоких параметров ($t''_2 > 510^\circ\text{C}$) даже при использовании легир. сталей $\eta_{\text{доп}} < 6\%$. На практике $\eta_{\text{доп}} > 10\%$ допускать нельзя

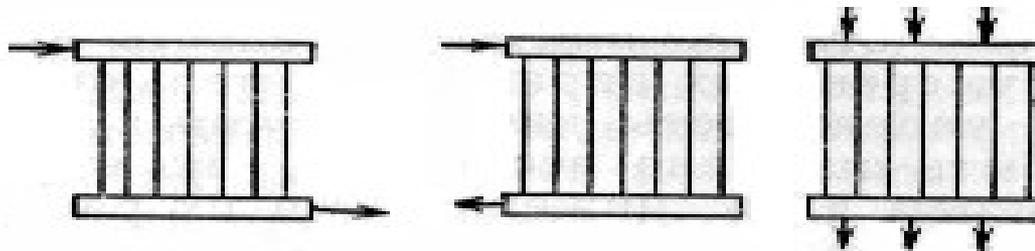
Опыт показал, что $\eta_{\text{г}}$ достигает 5-8%, значит $\eta_{\text{т}}$ должна быть исключена полностью.

Тепловые и гидродинамические условия работы пароперегревателей

Для максимального снижения гидравлической неравномерности необходимо обеспечить постоянство диаметров и суммы сопротивлений для всех трубок ПТО. Пригодны трубки особой поставки с незначительным разбросом по шероховатости.

Следует учитывать все составляющие сопротивлений, а также перепады давления для каждой трубки.

Изменение давления по длине коллекторов зависит от схем подвода и отвода пара. Наибольшая разница в перепадах давления будет в схеме Z (для крайних змеевиков). Применение рассредоточенного подвода и отвода среды уменьшает изменение статического давления по длине коллекторов.



Шайбование трубок применять можно, но нецелесообразно, так как $\uparrow \Delta p_T$ и \downarrow рабочее давление пара ($p_2'' = P_2' - \Delta p_T$), а значит \downarrow и экономичность АЭС.

Более целесообразен переход на материалы с необходимой жаропрочностью.

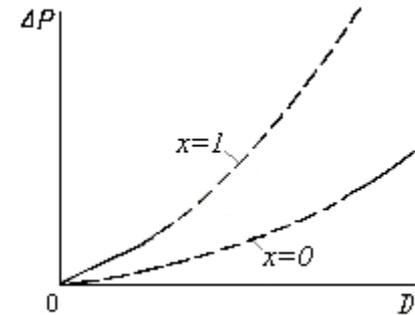
Гидродинамическая неустойчивость

Равномерное распределение двухфазной среды по параллельным каналам может нарушаться по 2 причинам:

- из-за гидравлической неравномерности,
- из-за неоднозначности ГДХ

Гидродинамическая характеристика канала: зависимость Δp_r от расхода (от массовой скорости - $w \cdot r$)

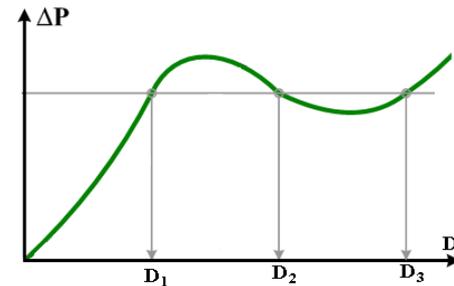
Для однофазных потоков – однозначная зависимость $\Delta p_r = f(D^2)$



(при $x=1$ кривая выше и круче, т.к. скорость пара больше)

($w = D \cdot v / f$ или $w \cdot r = D / f$)

При движении двухфазных потоков в обогреваемых каналах зависимость м.б. неоднозначной: $\Delta p_r = f(D^2)$ или $\Delta p_r = f(D^3)$

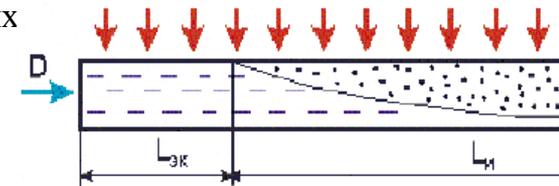


В результате – одному значению Δp_r соответствует разный расход смеси

Однозначные ГДХ – стабильные, неоднозначные – нестабильные

Нестабильные ГДХ могут иметь место только в поверхностях нагрева, имеющих экономайзерный участок!

(при \uparrow расхода по разному меняются скорости и плотности)



$$\Delta p_T = \xi \frac{L_{\text{эк}}}{d} \frac{\rho_v w_v^2}{2} + \xi \frac{L_{\text{учн}}}{d} \frac{\rho_{\text{см}} w_{\text{см}}^2}{2}$$

Гидродинамическая неустойчивость

В результате неустойчивой ГДХ при полной идентичности трубок и одинаковом обогреве могут иметь место разные расходы и энтальпии среды

С ростом давления характеристики более стабильны (меньше разность r' и r'')

Для повышения стабильности нужно сокращать эк.участок (приближение t к t_s)

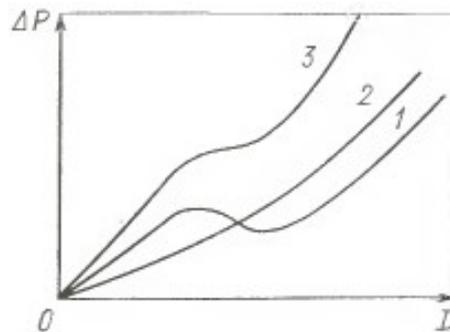
Условие стабильной ГДХ:

$$\Delta h_{\text{эк}} \leq 5 \frac{r}{\rho' / \rho'' - 1}$$

При невозможности выполнить это условие и работе ПТО при высоких t применяют меры конструктивного характера – шайбование. Чем больше сопротивление шайб, тем круче и монотоннее ГДХ.

Но шайбование требует больших напоров и затрат на перекачку

Для вертикальных труб большое влияние на ГДХ оказывает нивелирный напор и конструктивное исполнение. Например, U-образные поверхности – гораздо менее стабильны, чем N-образные



1 – ГДХ трубы

2 – ГДХ шайбы

3 – ГДХ трубы с шайбой

Общая пульсация расходов

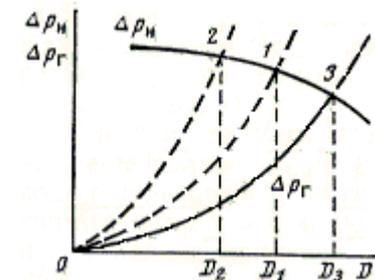
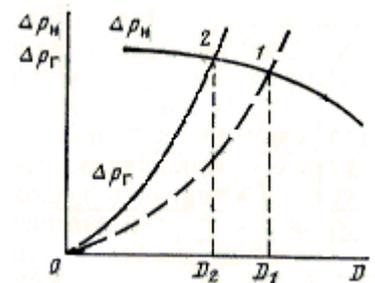
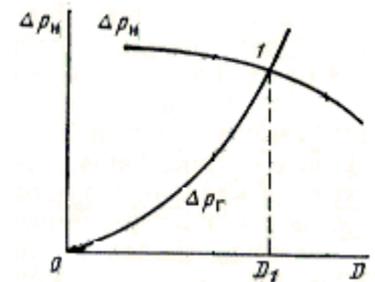
Общая пульсация - следствие неустойчивой работы ц/н насоса

Характеристика насоса (напор Δp_n и расход D) тесно связаны с ГДХ сети:

$\uparrow \Delta p_r$ - $\uparrow \Delta p_n$, $\downarrow D$ (т.2) - $\downarrow \Delta p_r$, $\uparrow D$ (т.3) и т.д.

Колебания носят затухающий характер (с \downarrow амплитуды).

Амплитуда колебаний ($D_3 - D_2$) тем меньше, чем круче характеристика насоса.



Межвитковая (межтрубная) пульсация

Межвитковая пульсация - периодическое изменение расхода среды на входе и выходе трубы (в противофазе).

Пульсации потока в параллельных трубах сдвинуты по фазе (общий расход ПГ и перепад давления в нем = const)

Наиболее вероятное место процесса - самое начало испарительного участка, где резко изменяется плотность среды

T металла стенки постоянно меняется при изменении расходов.

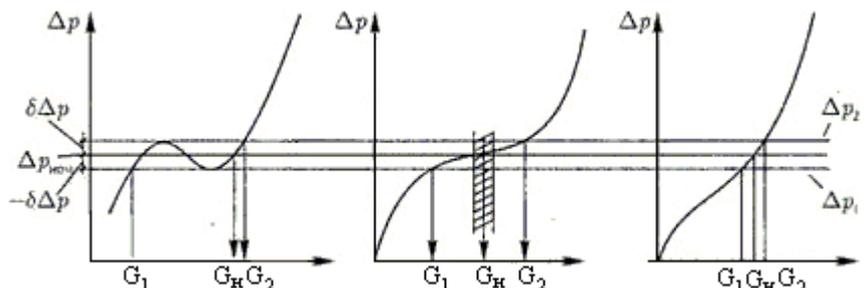
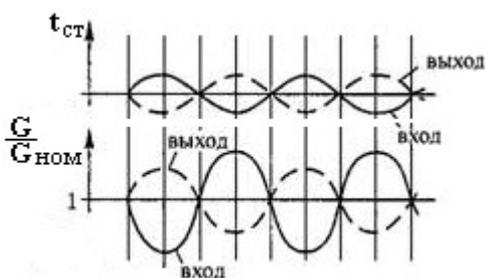
Межтрубная пульсация самопроизвольно не затухает, имеет автоколебательный характер.

Период пульсаций - 1-2 мин

Меры предотвращения межвитковых пульсаций : установка на входе в трубу дроссельной шайбы для повышения давления на входе и предотвращения обратного тока жидкости. Установлено, что пульсаций нет при $\Delta P_{эк}/\Delta P_{исп} > a$, где «а» - зависит от давления (\downarrow при $\uparrow p$) и величина $a < 1$

Возможность возникновения межвитковых пульсаций \downarrow с \uparrow давления и массовой скорости, а также при \downarrow удельного теплового потока.

Требования к ГДХ – однозначность (стабильность) и крутизна (без пологих участков - меньше ΔG при одинаковом Δp)



Тепловые и гидродинамические условия работы испарительных поверхностей

Испаритель с МПЦ

Наличие насоса – любая конфигурация ПТО

Скорость р.т. – 1.5 – 2 м/с отсутствие застойных зон пара

Кратность циркуляции: 4 – 8 ($x = 0,12 - 0,25$), поэтому $\eta_{доп} = 3 - 5$

Большое влияние цирк. насоса на надежность и ГД стабильность:

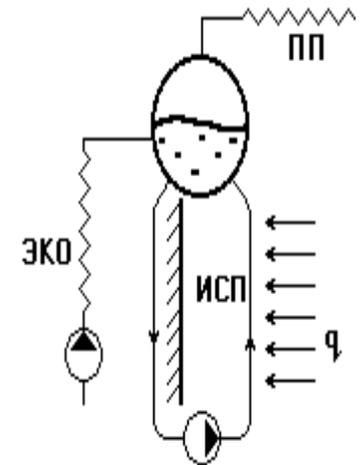
- напор насоса (0.2-0.3 МПа) увеличивает эк. участок и $\Delta h_{эк}$.
- сам ЦН работает на воде с t близкой к t_s .

Для отсутствия вскипания воды в насосе (кавитации) необходимо увеличить давление перед насосом:

$$p_n = p_b + H_n \cdot r' \cdot g - \Delta p_{оп} \rightarrow \text{нужно } \uparrow H_n$$

Кавитация возможна и при резких \downarrow давления в барабане и опускной системе

Испарители с МПЦ имеют склонность к межвитковой пульсацией расходов (перераспределение расходов по параллельным каналам).



Тепловые и гидродинамические условия работы испарительных поверхностей

Прямоточные испарители

Самая простая схема прямоточного испарителя состоит из экономайзерного и испарительного участков. Просто, но не обеспечивает стабильность ГДХ

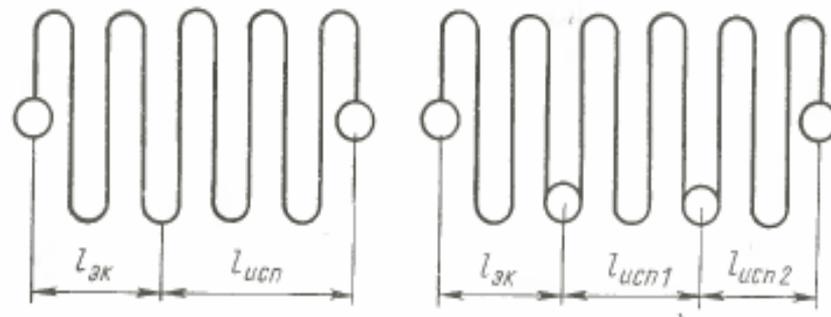
Установка промежуточного коллектора повышает стабильность. Но при \downarrow нагрузки возможно смещение зоны начала парообразования в начало.

Установка ещё одного пром. коллектора существенно повысит стабильность работы всего испарителя (нестабильность на 1 участке энтальпии не опасна – низкие энтальпии среды)

Доп. условия: горизонтальное расположение коллектора, отвод п/в смеси трубами из верхней образующей коллекторов

Другие способы:

- повышение массовой скорости среды,
- установка дроссельных шайб на входе в экономайзерный участок,
- ступенчатое изменение диаметра труб



Тепловые условия работы прямоточного испарителя

5 участков с разными закономерностями теплообмена и темпер. режимами:

I – экономайзерный участок: нагрев до $t < t_s$ Граница участка – $t_{ct} > t_s$.

Турбулентное движение однофазной среды

II – $t_{ж} \uparrow$ до t_s , $t_{ct} = \text{const}$. Высокая интенсивность теплообмена за счет турбулизации пограничного слоя (парообразование и конденсация паровых пузырей)

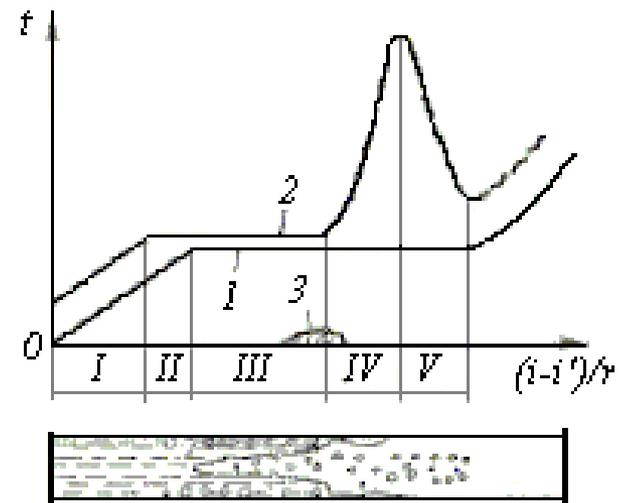
III – участок пузырькового кипения, $t_{ct} = \text{const}$

IV – резкое ухудшение передачи тепла, переход к пленочному кипению, рост t_{ct} , $x > 0.8$, образование отложений

V участок: паросодержание близко к 1
 \uparrow а за счет \uparrow скорости пара, $\downarrow t_{ct}$

VI – участок перегретого пара –
возможен при наличии тепловой разверки

Для прямоточных испарителей $\eta_{\text{доп}} = 10-15\%$



Условия работы испарительных поверхностей ПГ с естественной циркуляцией

Состав контура ЕЦ: Б-С, оп.тр.с., к-р, п.тр.с.

Простые и сложные контуры (несколько подъемных звеньев)

$$D_{пв} = (1,005 - 1,01)D_{п}$$

$$k_{ц} = D_{ц}/D_{п} = 1/x$$

$$\text{движ. напор: } p_{дв} = H_{п} \cdot g \cdot r_{оп} - H_{п} \cdot g \cdot r_{под}$$

$$\text{при } r_{оп} = r', H_{по} = 0:$$

$$p_{дв} = (H_{об} - H_{тз}) \cdot g \cdot (r' - r_{см})$$

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

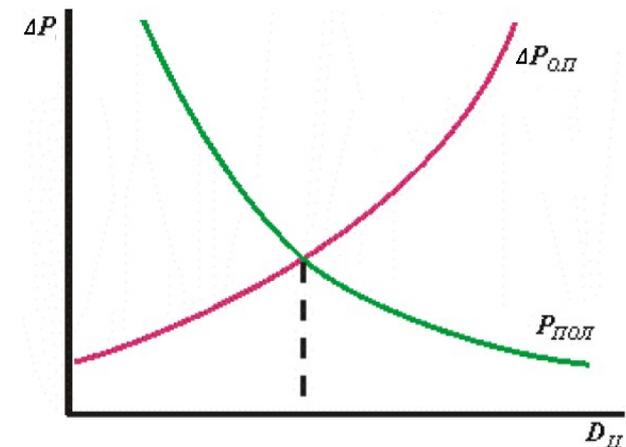
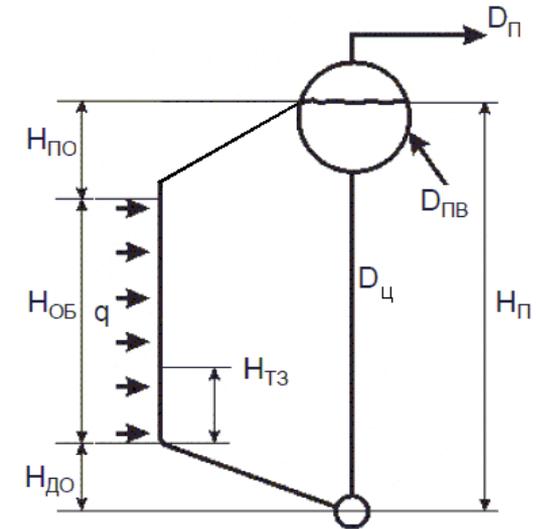
$$\text{полезный напор: } p_{пол} = p_{дв} - \Delta p_{под} = \Delta p_{оп}$$

Решение уравнения циркуляции:

- $p_{под} = f(D_{ц}), \Delta p_{оп} = f(D_{ц})$
- С ростом $D_{ц} \uparrow \Delta p_{оп}$, а $p_{пол} \downarrow$ (т.к. $\downarrow \varphi$ и $\uparrow H_{тз}$)

Зная $D_{ц}$ – находим $k_{ц} = D_{ц}/D_{п}$ и $x=1/k_{ц}$

- $k_{ц} = 3 - 8$ ($x < 35\%$) – для развитого пузырькового кипения и отсутствия отложений
- $k_{ц} > 8$ – рост кап. затрат



Условия работы испарительных поверхностей ПГ с естественной циркуляцией

Надежность естественной циркуляции

нарушение циркуляции возможно при малой разности r' и $r_{см}$

$$: p_{дв} = (H_{об} \cdot \rho - H_{ТЗ}) \cdot g \cdot (r' - r_{см})$$

- «свободный уровень»: слабо обогреваемая трубка включена в паровой объем

- «опрокидывание циркуляции»: слабо обогреваемая трубка включена в водяной объем

Проблемы в опускной системе: рост $\Delta p_{оп}$ (из-за наличия пара):

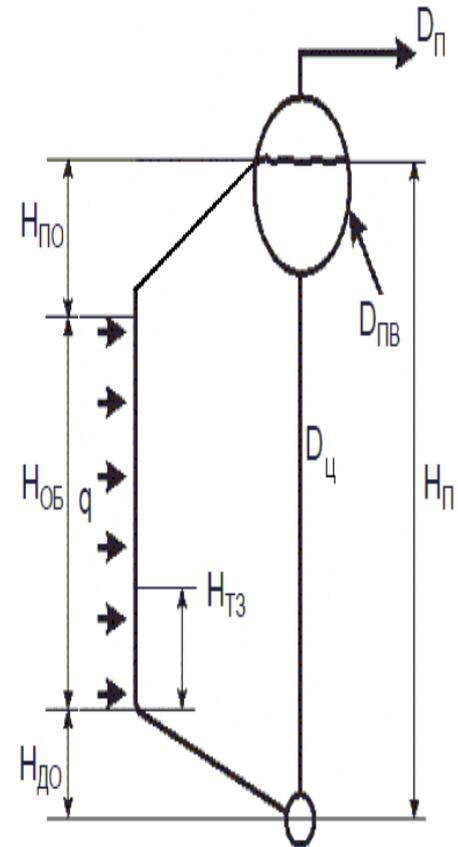
- «захват пара из барабана». трубы близки к зеркалу и большой диаметр труб.

- «вскипание воды на входе в опускные трубы»

Изменение давления в контуре:

- снижение давления – снижение $t_{2с}$, тепло, аккумулир. в металле труб передается воде – вскипание

- рост давления не влияет на опускную систему, но снижает полезный напор



Условия работы испарительных поверхностей ПГ с естественной циркуляцией

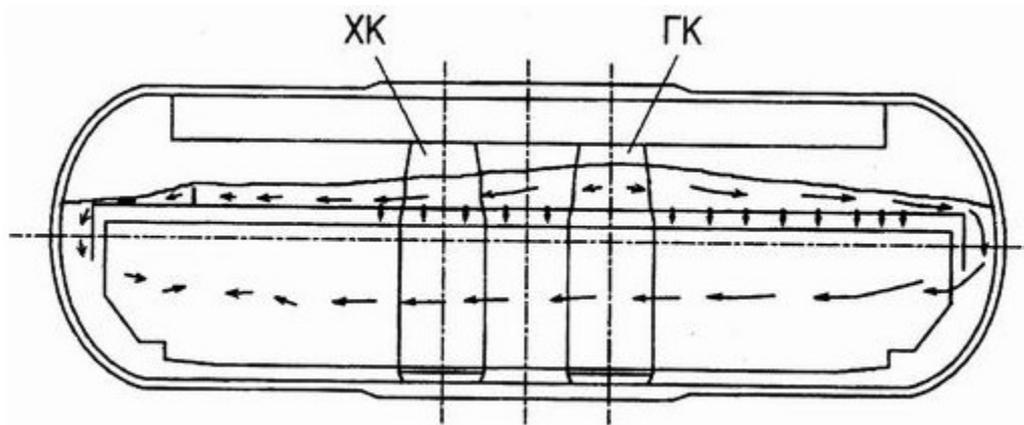
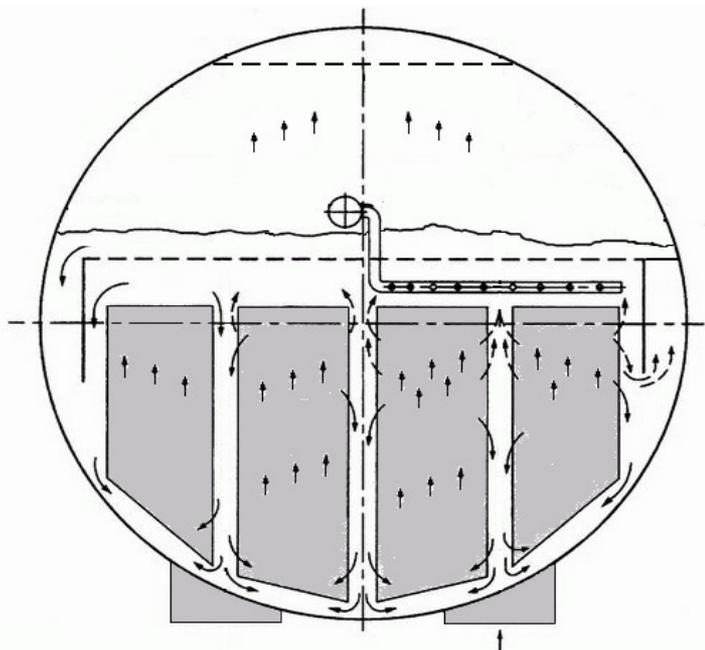
Низкие температуры

Кратность циркуляции = 3-4

Скорость пара 0.3 - 0.5 м/с

Проблемы:

- отложения примесей,
- коррозия (КРН) трубок



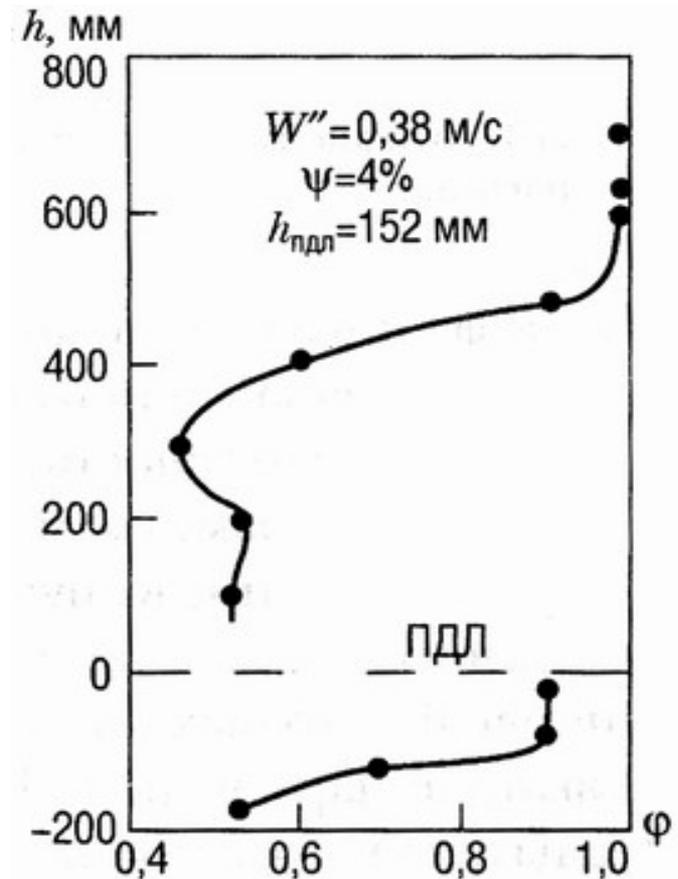
Условия работы испарительных поверхностей ПГ с естественной циркуляцией

по высоте 3 участка:

1 участок представляет собой движущуюся через пучок труб двухфазную смесь с переменным значением истинного паросодержания φ по высоте. Наиболее вероятен пузырьковый режим течения.

2 участок - паровая подушка под ПДЛ, в пределах которой преобладает пар ($\varphi > 0,85$), течение приближается к дисперсному (парокапельному) режиму

3 участок - слой жидкости над ПДЛ. Здесь происходит барботажа пара через слой жидкости с преобладающей стабилизированной зоной паросодержания по высоте и тонким слоем переходной зоны (граница раздела фаз), в пределах которой φ возрастает практически до 1



Благодарю за внимание!