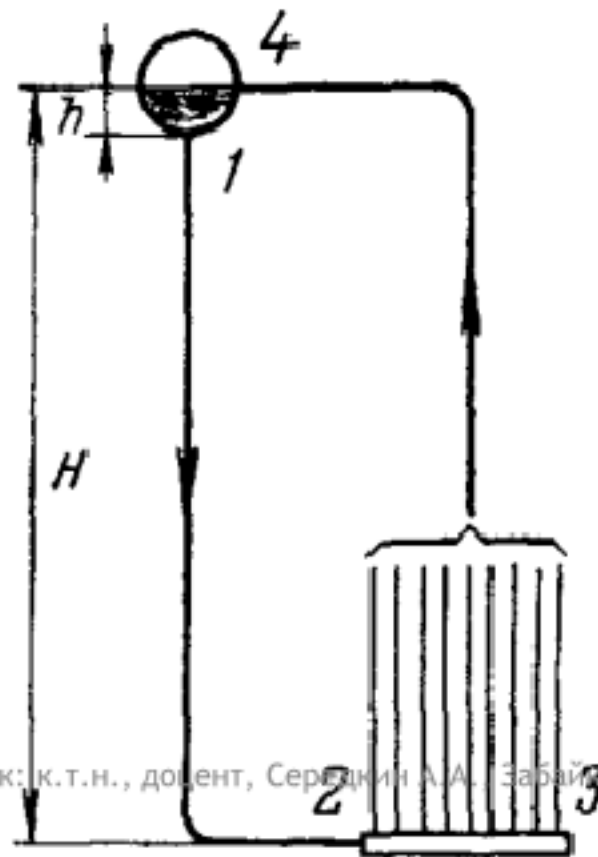


25. Закономерности естественной циркуляции.

В топочной камере паровых котлов с естественной циркуляцией обычно располагаются парообразующие трубы циркуляционных контуров. В контурах организуется непрерывное движение воды и пароводяной смеси (циркуляция), благодаря чему обеспечивается непрерывный и достаточно эффективный отвод тепла от поверхности нагрева. Это позволяет поддерживать температуру металла поверхности нагрева на допустимом уровне, следовательно, обеспечивать надежную длительную работу контуров циркуляции.

Естественная циркуляция создается движущим напором циркуляции $S_{ДВ}$, возникающим при обогреве подъемных вертикальных труб.



**К выводу основного
уравнения
циркуляции**

Запишем уравнение Бернулли для каждого звена циркуляционного контура. Здесь принято, что на участке 3-4 движется пароводяная смесь плотностью ρ_H , а на остальном пути, т.е. на участках 4-1-2-3 – вода плотностью ρ' при давлении в барабане. Плоскость сравнения принята на уровне коллектора 2-3.

Звено 1-2 (опускные трубы)

$$(H - h) \rho' g + p_1 + \frac{w_1^2}{2} \rho' = p_2 + \frac{w_2^2}{2} \rho' + \Delta p_{1-2}.$$

Аналогично для звеньев 2-3 (нижний коллектор), 3-4 (подъемные трубы) и 4-1 (водяной объем барабана) можно записать:

$$p_2 + \frac{w_2^2}{2} \rho' = p_3 + \frac{w_3^2}{2} \rho' + \Delta p_{2-3};$$

$$p_3 + \frac{w_3^2}{2} \rho' = H \rho_H g + p_4 + \frac{w_4^2}{2} \rho_H + \Delta p_{3-4};$$

$$H \rho' g + p_4 + \frac{w_4^2}{2} \rho_H = (H - h) \rho' g + p_1 + \frac{w_1^2}{2} \rho' + \Delta p_{4-1}.$$

Суммируя перепады давления в звеньях циркуляционного контура можно получить:

$$H (\rho' - \bar{\rho}'_H) g = \Sigma \Delta p_{\Gamma} = S_{\text{дв.}}$$

При установившемся движении разность давлений столбов воды в опускных трубах и пароводяной смеси в подъемных трубах уравнивается суммой гидравлических сопротивлений, возникающих вследствие движения рабочей среды в контуре. Отнеся все сопротивления к опускным и подъемным звеньям контура, получаем:

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

Разность движущегося напора циркуляции и сопротивления подъемных труб называют **полезным напором циркуляции**:

$$S_{\text{пол}} = S_{\text{дв.}} - \Delta p_{\text{под.}}$$

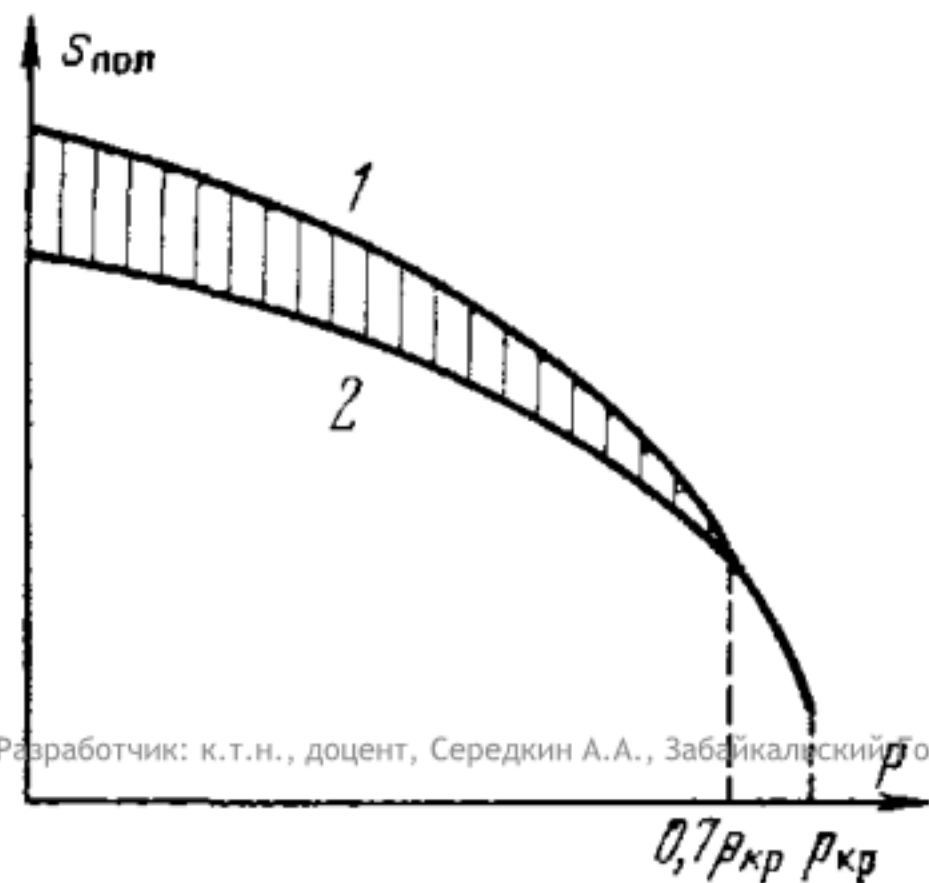
Из сопоставления последних двух уравнений получаем **основное уравнение циркуляции**:

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

т.е. полезный напор циркуляции расходуется на преодоление сопротивления в опускных звеньях.

На движущийся напор циркуляции, а следовательно, и полезный напор циркуляции сильное влияние оказывает относительная скорость пара (w_T). Это влияние выражается в том, что относительная скорость пара при данном его массовом расходе в подъемных трубах приводит к уменьшению доли сечения, занятого паром φ , и соответствующему увеличению доли сечения, занятого водой ($1 - \varphi$), в связи с чем плотность пароводяной смеси в подъемных трубах возрастает.

При прочих равных условиях полезный напор циркуляции зависит от давления в контуре. Чем выше давление, тем выше плотность пароводяной смеси в подъемных трубах и потому $S_{\text{ПОЛ}}$ меньше. По мере приближения к критическому давлению $S_{\text{ПОЛ}}$ уменьшается и приобретает сравнительно небольшое значение. В этих условиях естественная циркуляция малоэффективна. Предельное давление, при котором еще обеспечивается надежная естественная циркуляция в котлах, 18 – 19 МПа.



Влияние давления на полезный напор циркуляции: 1 – без учета w_G ; 2 – с учетом w_G .

Влияние относительной скорости пара W_{Γ} зависит от давления в контуре. При низком давлении, характеризующемся снарядным движением потока, крупные образования пара вызывают большую W_{Γ} . С повышением давления и температуры насыщения уменьшается поверхностное натяжение, пузыри пара становятся малопрочными и мелкими, относительная скорость пара при этом уменьшается. При $p/p_{KR} > 0,7$ влиянием W_{Γ} можно пренебречь.

Итоговая формула для расчета движущегося напора циркуляции может быть представлена следующим образом:

$$S_{\text{ДВ}} = H (\rho' - \bar{\rho}_{\text{H}}) g = H\varphi (\rho' - \rho'') g.$$

Формула выведена в предположении, что подъемные трубы циркуляционного контура содержат пароводяную смесь по всей их высоте.

В действительности развитое кипение в подъемных трубах начинается выше входа, в соответствии с чем вся высота труб делится на экономайзерный $H_{ЭК}$ и парообразующий участки $H_{ПАР}$.

Сечение, в котором начинается развитое кипение, называют **сечением закипания**. Высота парообразующего участка подъемных труб

$$H_{пар} = H - H_{эк},$$

которая и подставляется в уравнение для определения движущегося напора циркуляции $S_{ДВ}$.

Высота экономайзерного участка $H_{ЭК}$ определяется исходя из баланса теплоты на этом участке: количества теплоты, которую необходимо передать в единицу времени воде для подогрева ее до кипения на экономайзерном участке, и количества теплоты, получаемой за то же время из топки на экономайзерном участке.

26. Методика расчета контура циркуляции.

Различают **простые** и **сложные** контуры естественной циркуляции.

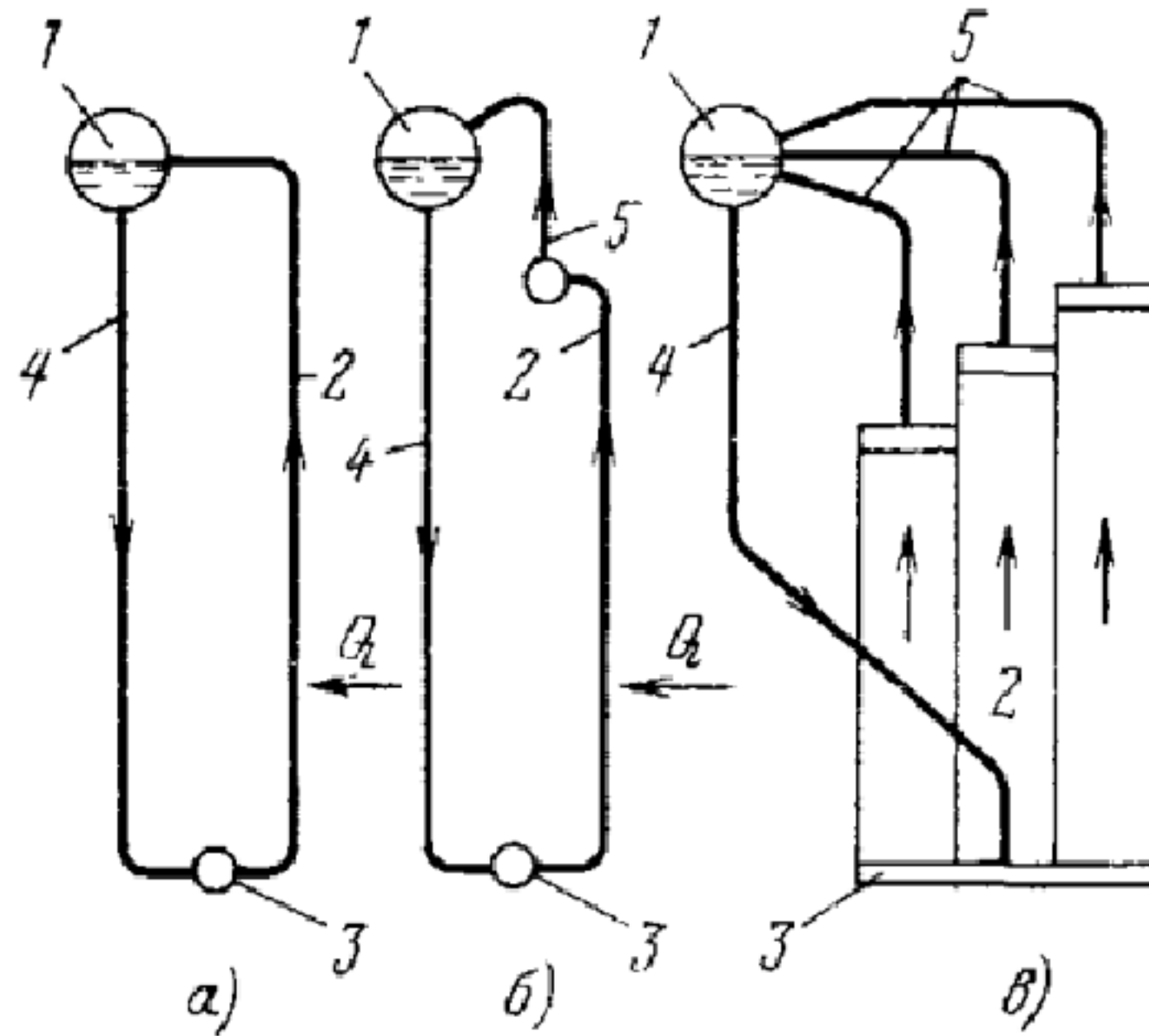


Схема простого (*а, б*) и сложного (*в*) контуров циркуляции:

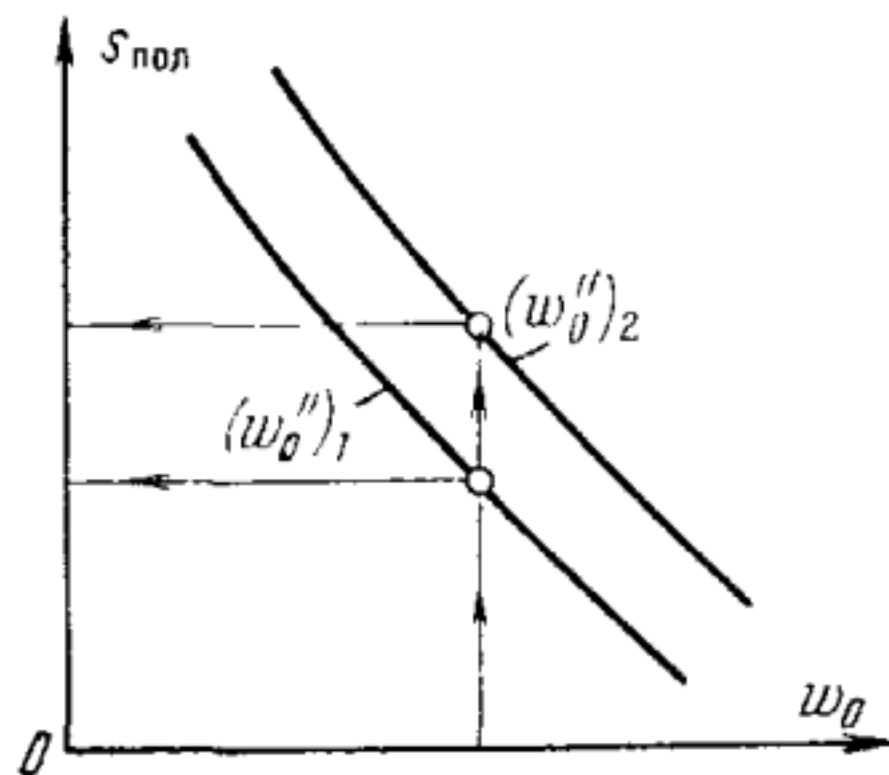
- 1 – барабан;
- 2 – подъемные трубы (панели);
- 3 – коллектор;
- 4 – опускные трубы;
- 5 – пароводящие трубы.

В **простом контуре** циркуляции (рис. а, б) все подъемные трубы имеют одинаковые геометрические характеристики – диаметр, длину и конфигурацию труб и одинаковые условия обогрева. Простые контуры циркуляции не имеют общих элементов с другими контурами. Примером такого контура может служить топочный экран.

Отличительными особенностями **сложного контура** (рис. в) являются различие геометрических характеристик подъемных труб и их обогрева. Общими элементами являются опускные трубы, обеспечивающие питание подъемных звеньев всех циркуляционных контуров, образующих сложный контур.

Простой контур циркуляции

Основное уравнение циркуляции $S_{\text{пол}} = \Delta p_{\text{оп}}$ решают графоаналитически. Обе части уравнения зависят от расхода воды (скорости циркуляции w_0). С увеличением w_0 полезный напор циркуляции уменьшается (рис.), а гидравлическое сопротивление опускных звеньев контура растет пропорционально квадрату расхода.



Влияние скорости циркуляции на полезный напор

Простой контур циркуляции

Построим диаграммы циркуляции.

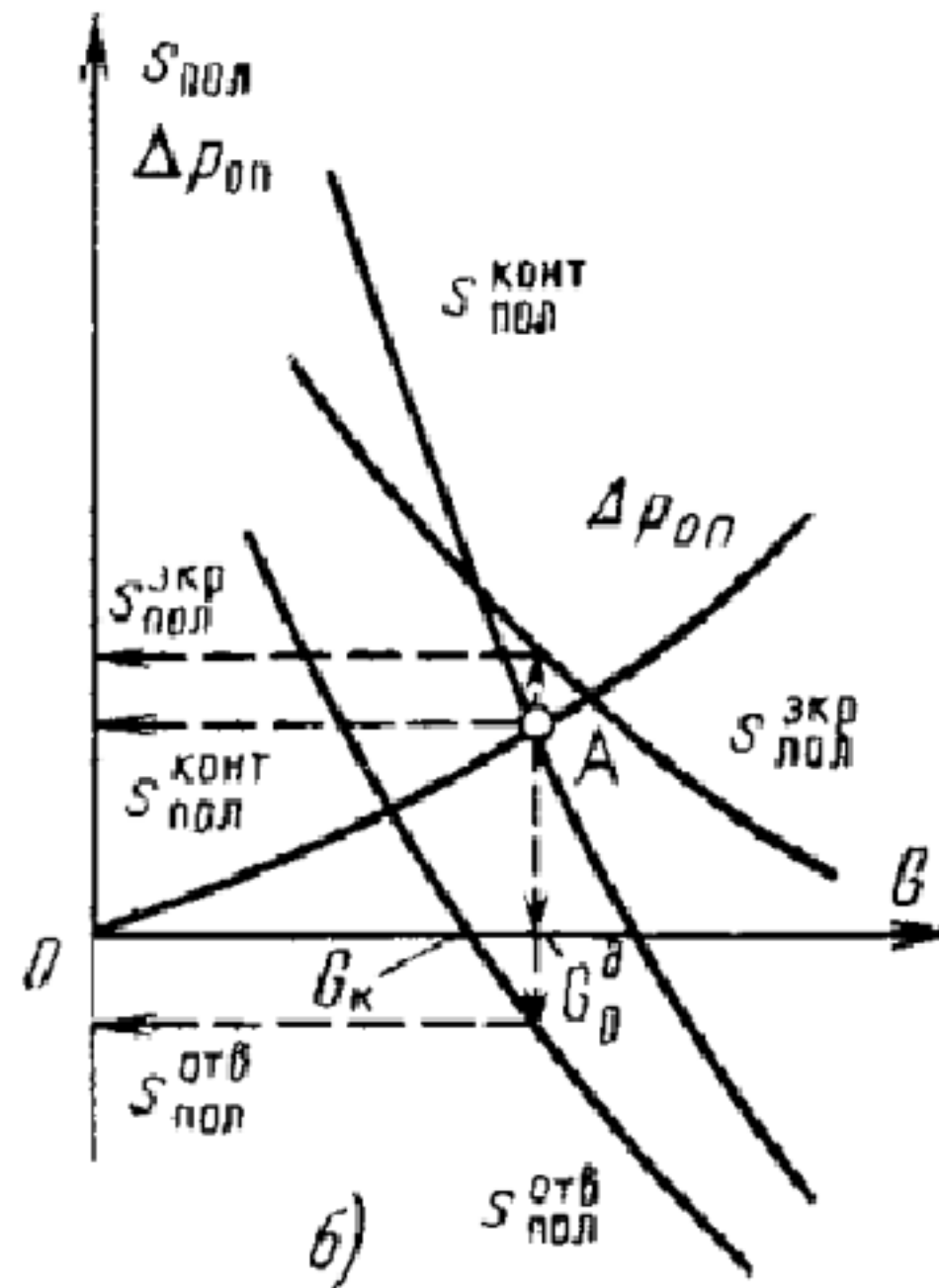
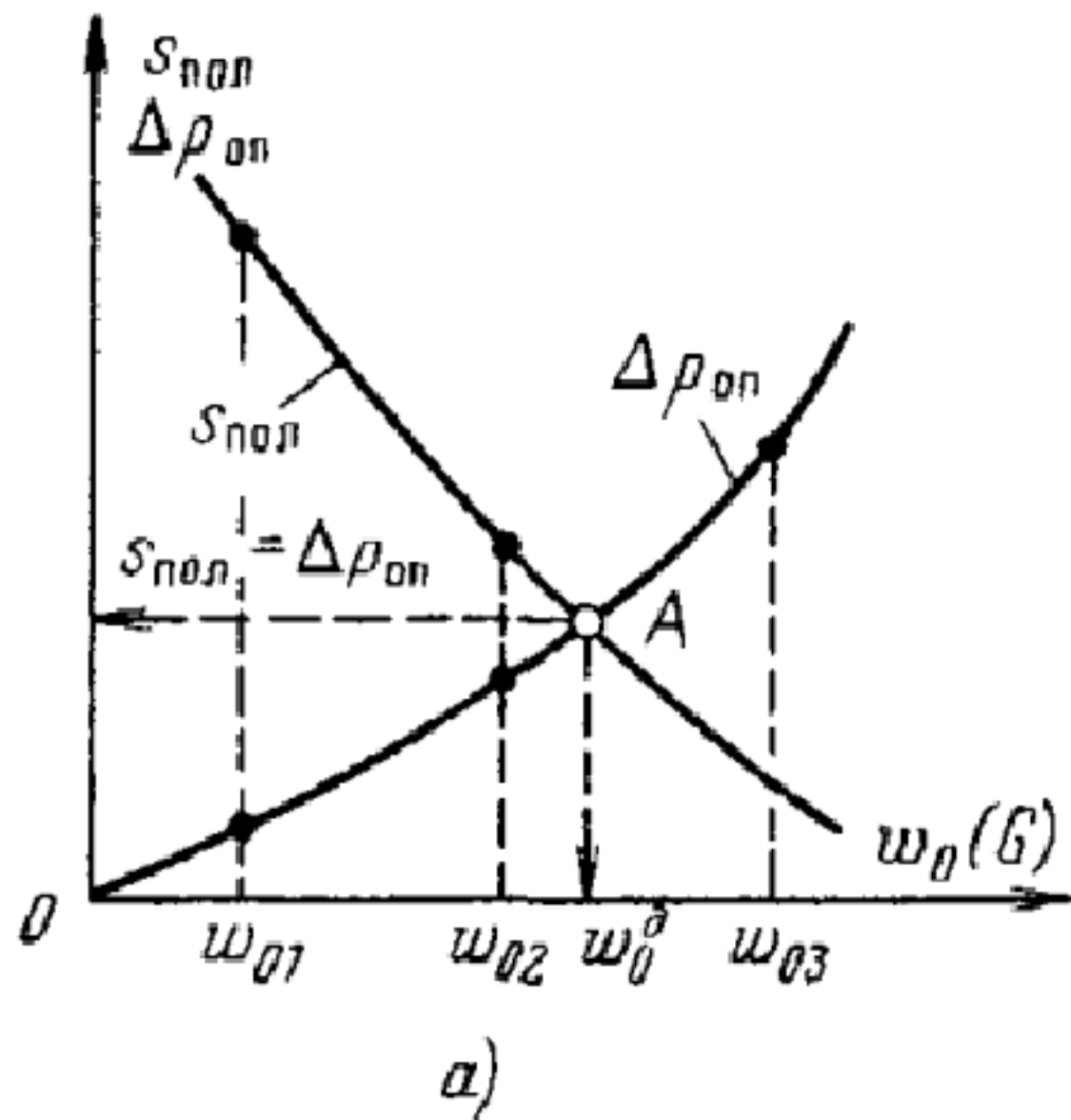


Диаграмма циркуляции простого контура:

a – с непосредственным присоединением парообразующих труб к барабану;

b – с пароотводящими трубами;

A – рабочая точка диаграммы;

w_0^D – действительная скорость циркуляции (расход воды).

Простой контур циркуляции

Для построения диаграммы циркуляции обычно задаются тремя значениями скоростей циркуляции: w_{01} ; w_{02} ; w_{03} . В ходе выполнения расчета циркуляции последовательно определяют:

- гидравлическое сопротивление опускных труб, по которым движется вода;
- высоту экономайзерного участка и соответственно высоту парообразующего участка;
- относительное сечение занятое паром;
- движущийся напор циркуляции;
- сопротивление подъемного участка, по которому движется пароводяная смесь;
- полезный напор циркуляции.

Простой контур циркуляции

По результатам расчета строят диаграмму циркуляции (рис. *a*), включающую зависимости $S_{\text{ПОЛ}} = f(w_0)$ и $\Delta p_{\text{ОП}} = f(w_0)$. Пересечение кривых $S_{\text{ПОЛ}}$ и $\Delta p_{\text{ОП}}$ определяет рабочую точку А диаграммы циркуляции, координаты которой удовлетворяют уравнению циркуляции. В рабочей точке диаграммы определяют действительную скорость циркуляции $w_0^{\text{Д}}$, которая в совокупности с количеством образующегося в контуре пара $G_{\text{П}}$ позволяет определить кратность циркуляции K в контуре.

Простой контур циркуляции

В современных паровых котлах контуры циркуляции, как правило, выполняются простыми в виде панелей топочных экранов с пароотводящими трубами. В таком контуре движущийся напор образуется и в обогреваемых экранных трубах, и необогреваемых пароотводящих трубах, поскольку они также заполнены пароводяной смесью (рис. б). Суммарный полезный напор контура $S_{ПОЛ}^{КОНТ} = S_{ПОЛ}^{ЭКР} + S_{ПОЛ}^{ОТВ}$ затрачивается на преодоление гидравлического сопротивления опускных труб $\Delta p_{ОП}$. Координаты точки А пересечения кривых дают действительный расход в контуре $G_0^Д$ и полезный напор $S_{ПОЛ}^{КОНТ}$.

Сложный контур циркуляции

Для сложного контура циркуляции с общей опускной системой (рис. в) в рекомендованной последовательности строят кривые полезных напоров $S_{\text{ПОЛ I}} = (S_{\text{ПОЛ}}^{\text{ЭКР}} + S_{\text{ПОЛ}}^{\text{ОТВ}})_I$, $S_{\text{ПОЛ II}} = (S_{\text{ПОЛ}}^{\text{ЭКР}} + S_{\text{ПОЛ}}^{\text{ОТВ}})_{II}$ и $S_{\text{ПОЛ III}} = (S_{\text{ПОЛ}}^{\text{ЭКР}} + S_{\text{ПОЛ}}^{\text{ОТВ}})_{III}$ для каждого подъемного звена сложного контура.

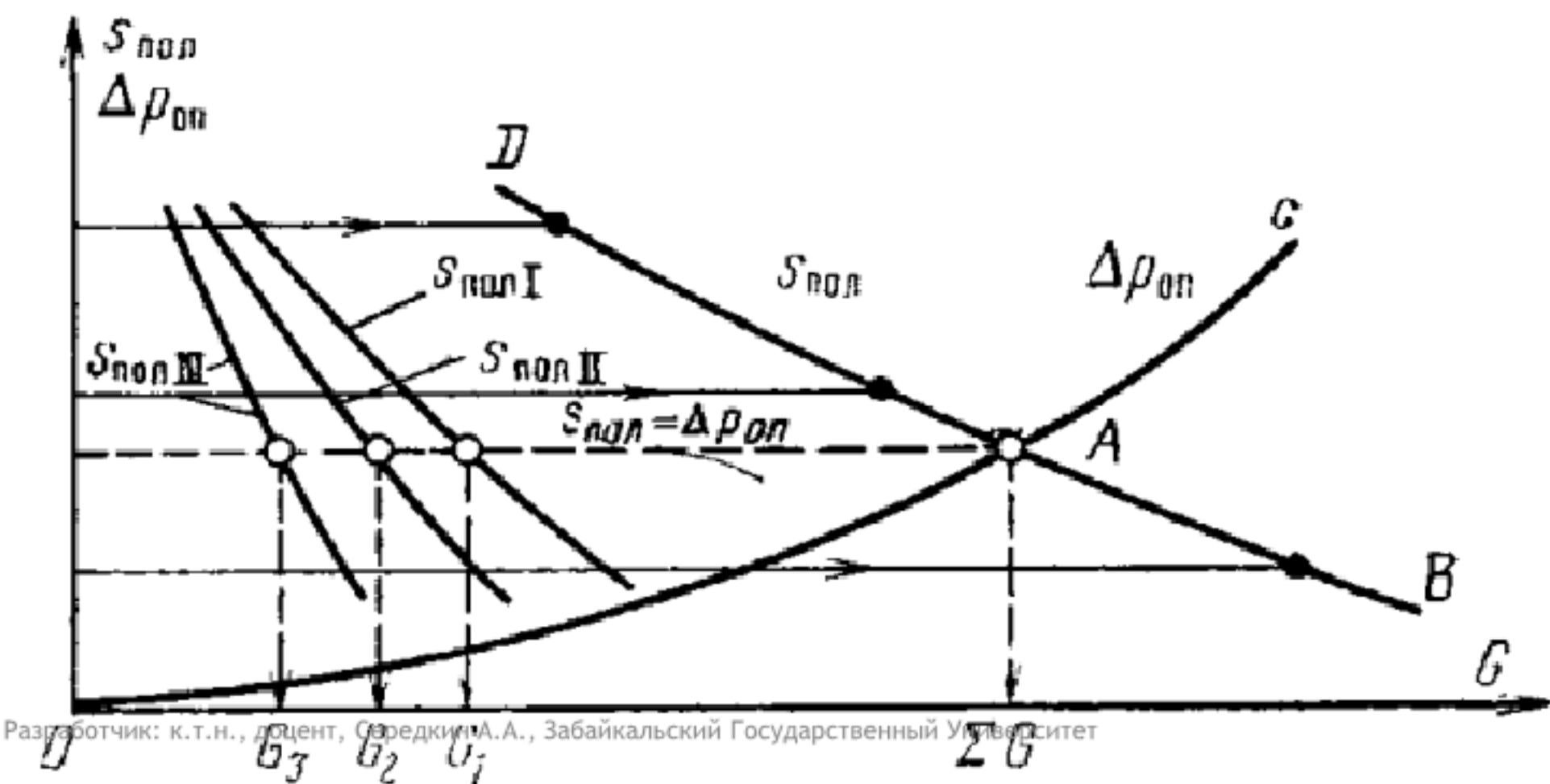


Диаграмма циркуляции сложного контура.

Сложный контур циркуляции

Поскольку все звенья сложного контура работают параллельно в общем перепаде давления, их циркуляционные характеристики суммируют сложением расходов воды при одинаковых значениях полезных напоров (по абсциссам, ось x) и находят суммарную характеристику $DВ$. Строят также кривую $ОС$ сопротивления опускного (водоподводящего) участка контура, общего для всех подъемных звеньев. Пересечение кривых $DВ$ и $ОС$ определяет рабочую точку A диаграммы циркуляции, по которой находят суммарный расход воды в сложном контуре $\sum G$ и полезный напор $S_{ПОЛ}$. Расход воды в звеньях по точкам пересечения горизонтали, проведенной через рабочую точку диаграммы, с кривыми полезного напора циркуляции для каждого звена контура. По расходу воды и количеству полученного пара в каждом звене (панели) находят действительные значения соответственно W_0 и K , а также подсчитывают $W_{0П}$ и общую кратность циркуляции сложного контура.