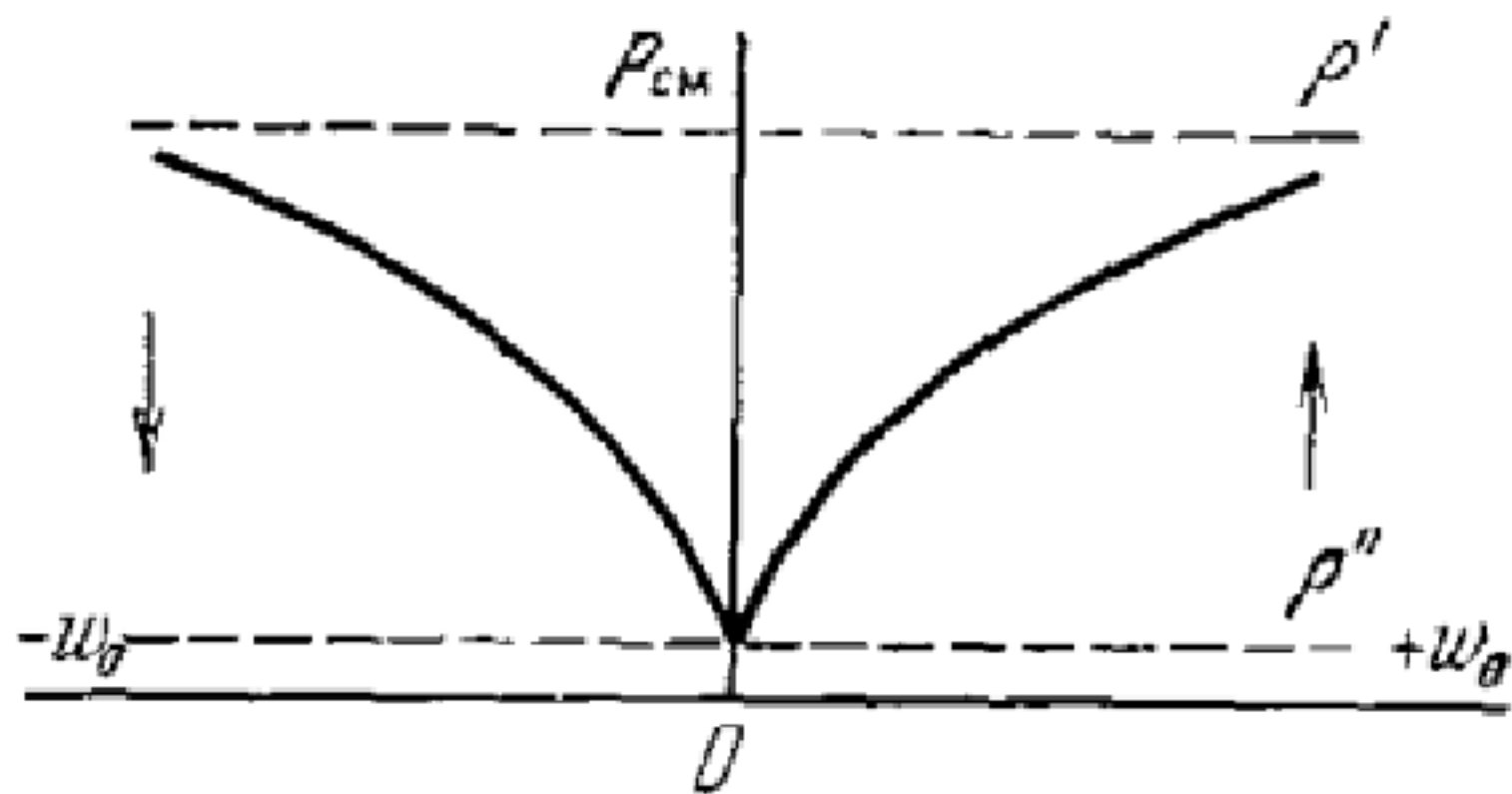
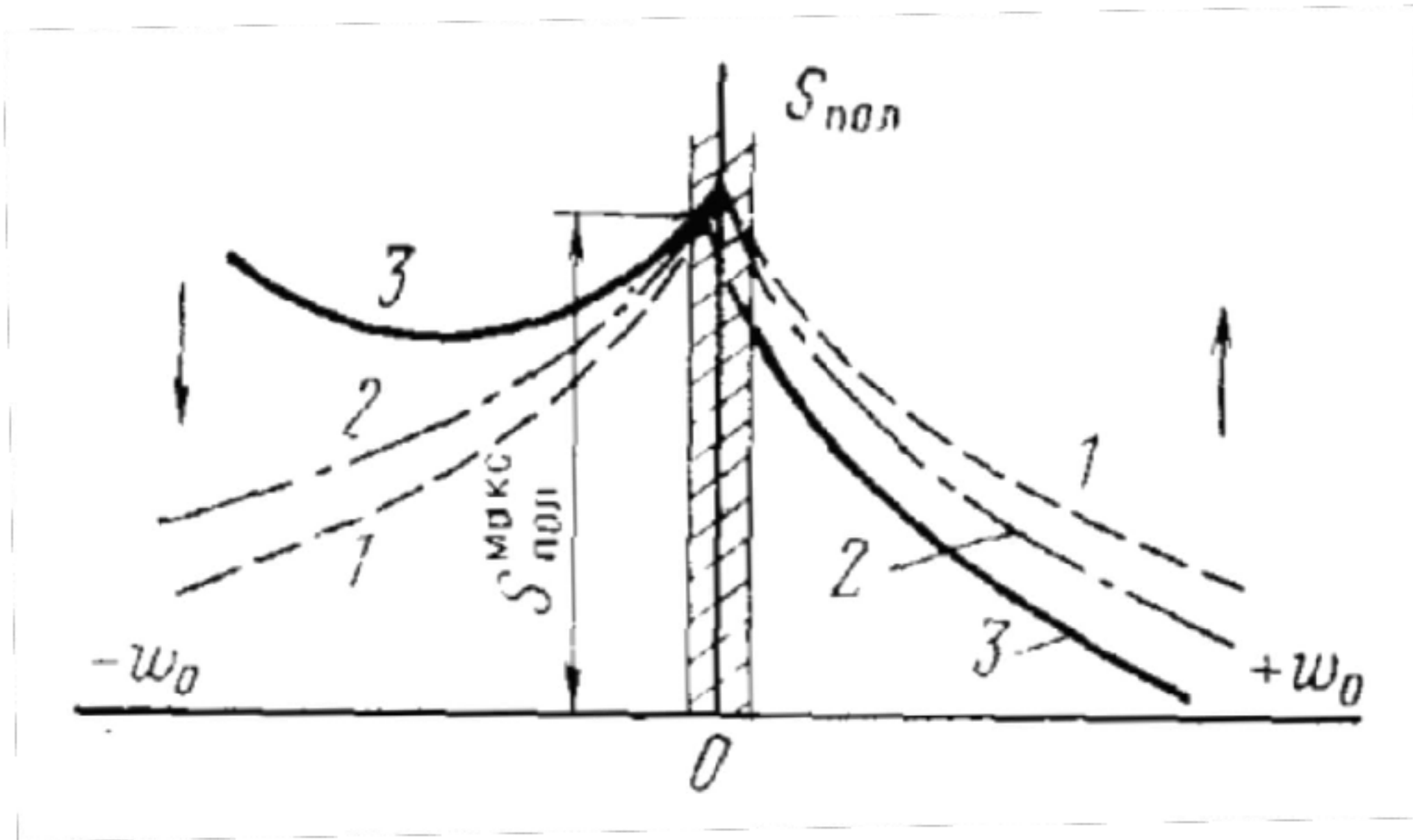


27. Полная гидравлическая характеристика парообразующих труб.

Полная гидравлическая характеристика парообразующей трубы выражает зависимость полезного напора циркуляции от расхода и включает подъемное и опускное движение рабочей среды. Для ее построения рассмотрим сначала закономерности распределения плотности пароводяной смеси в парообразующей трубе в зависимости от скорости циркуляции при постоянной интенсивности обогрева.



Характер изменения плотности пароводяной смеси $\rho_{см}$ в зависимости от скорости циркуляции w_0 в режимах подъемного и опускного движения



Влияние скольжения пара и трения на полную гидравлическую характеристику парообразующей трубы: 1 – теоретический напор циркуляции (без учета скольжения пара и трения); 2 – с учетом скольжения пара; 3 – с учетом скольжения и трения.

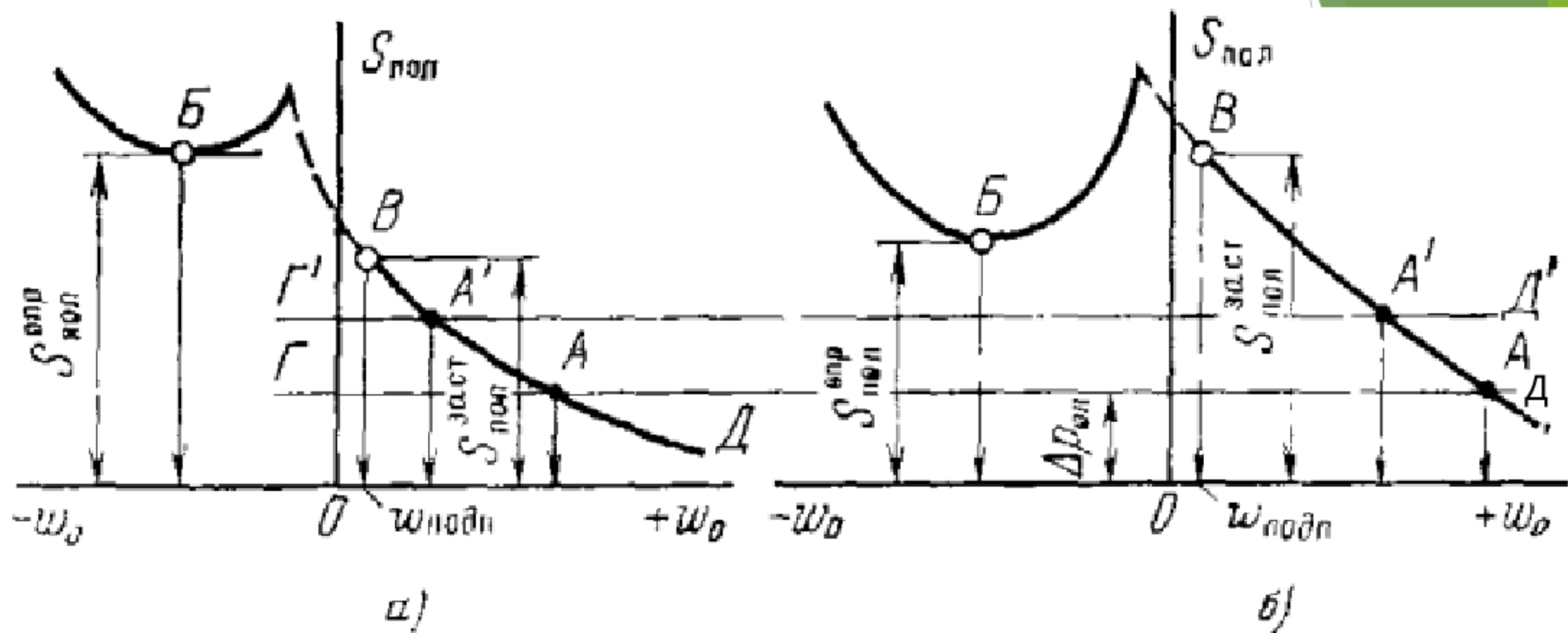
Без учета относительной скорости пара и трения в трубах Δp_{TP} кривая ρ_{CM} симметрична, опирается своей вершиной в точке, отвечающей скорости циркуляции $w_0=0$ и граничной плотности ρ^I . Это означает что при нулевом расходе воды труба заполнена только паром. Увеличение расхода воды при данном обогреве приводит к росту плотности пароводяной смеси, которая при больших W_0 асимптотически приближается к своему предельному значению ρ^I .
Полная гидравлическая характеристика парообразующей трубы контура циркуляции для указанных выше условий (нулевая относительная скорость пара, $\Delta p_{TP} = 0$) представляет собой зеркальное изображение кривой ρ_{CM} (кривая 1).

По мере уменьшения скорости циркуляции w_0 полезный напор симметрично увеличивается и в пределе стремится к своему максимальному значению

$$S_{\text{пол}}^{\text{макс}} = H (\rho' - \rho'') g.$$

На полезный напор циркуляции большое влияние оказывает **относительная скорость пара**. В зависимости от направления движения потока это влияние различно. В подъемном движении $\rho_{\text{см}}$ увеличивается и потому уменьшается $S_{\text{пол}}$, а в опускном наоборот. Силы трения всегда направлены против движения, в связи с чем в подъемном движении потери напора на трение уменьшают $S_{\text{пол}}$, а в опускном – увеличивают его (кривая 3).

Понятие нулевой скорости циркуляции условное, поскольку подъемная труба обогревается и потому выдает пар в количестве, отвечающем приобретенной теплоте. Для выработки пара она должна получать воду. Скорость поступающей в подъемные трубы воды, которая восполняет расход пара при обогреве в отсутствие циркуляции, называется скоростью подпитки $W_{\text{ПОДП}}$. Скорость подпитки означает, во-первых, малое количество воды, поступающей в парообразующую трубу снизу, и, во-вторых, предполагает возможность поступления в нее воды сверху. В этих условиях в парообразующей трубе возможно и подъемное и опускное движение. Область очень малых положительных и отрицательных скоростей циркуляции (заштрихованная область) обычно исключается из рассмотрения. Правая ветвь полной гидравлической характеристики отвечает подъемному движению среды, левая – опускному (опрокинутому). Взаимное расположение ветвей характеристики зависит от давления в контуре.

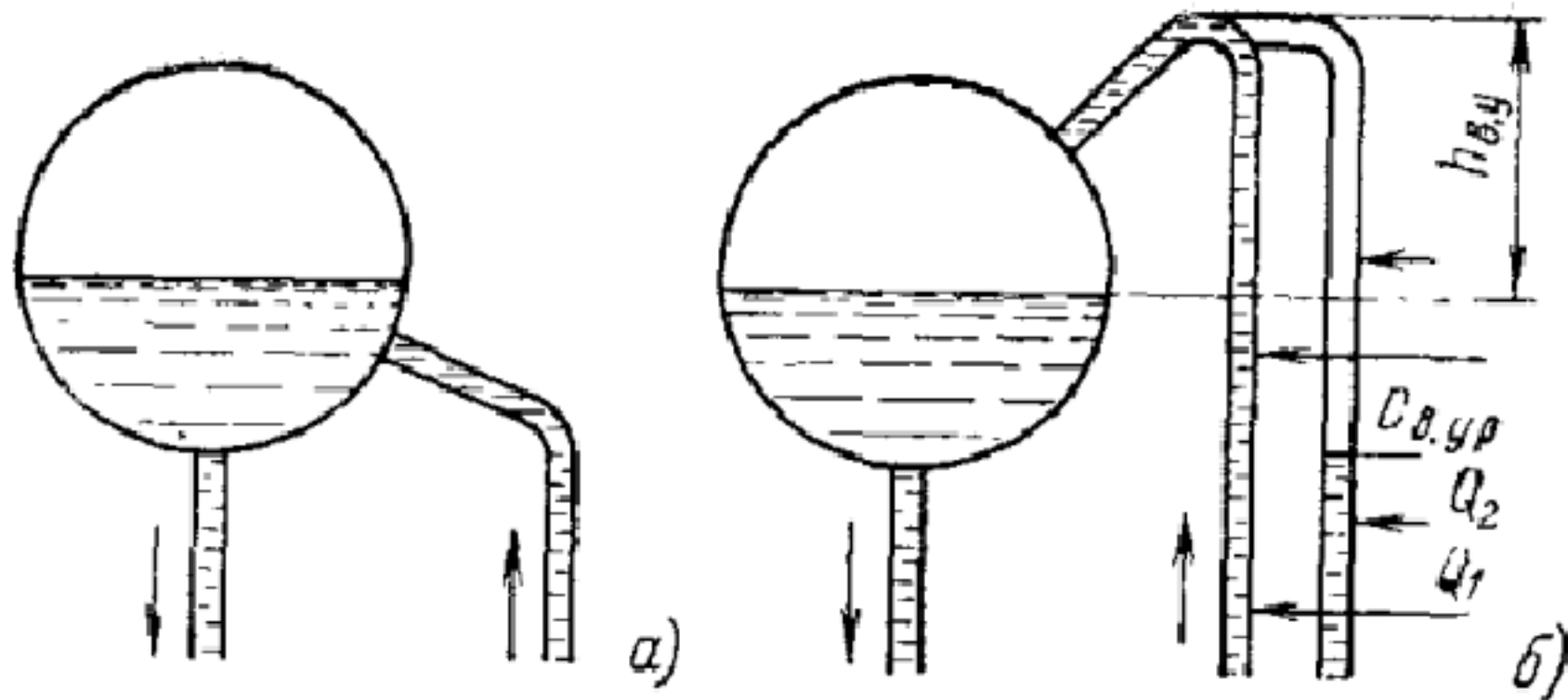


Влияние давления на полную гидравлическую характеристику паробразующей трубы: *а* – низкое давление; *б* – высокое давление.

При низком давлении велико влияние относительной скорости пара и потому левая ветвь характеристики располагается на диаграмме выше любой точки правой ветви (рис. а). При высоком давлении, наоборот, относительная скорость пара невелика, меньше гидравлическое сопротивление и, следовательно, значительная область левой ветви характеристики ориентируется ниже части правой ветви кривой, отвечающей малым скоростям циркуляции (рис. б).

На правой ветви характеристики можно выделить точку В, отвечающую расходу воды при скорости подпитки $(w\rho)_{\text{подп}}$. Ордината этой точки выражает полезный напор застоя $S_{\text{ПОЛ}}^{\text{ЗАСТ}}$, при котором движение среды практически прекращается и возникает явление **застоя циркуляции**.

Застой циркуляции охватывает область очень медленного движения воды в обогреваемой трубе вверх или вниз, однако пар движется только вверх, барботируя через столб находящейся в трубе воды. Застой циркуляции возникает в контуре с парообразующими трубами, включенными в водяной объем барабана, т.е. ниже уровня в нем воды (рис. а).



Схемы подвода парообразующих труб в барабан:

а – в водяной объем;
б – в паровой объем.

При подводе труб в паровой объем барабана (рис. б) в условиях очень медленного движения в них воды полезный напор недостаточен для преодоления сопротивления опускаемых труб и подъема среды до высшей отметки подъемных труб контура. В этих условиях в них образуется свободный уровень воды.

Левая ветвь характеристики, описывающая устойчивое опускаемое движение, имеет минимум в точке *Б*. Процесс перехода от подъемного движения к опускаемому проходит через нулевую скорость и носит название **опрокидывания циркуляции**. Ордината точки *Б* выражает полезный напор опрокидывания $S_{ПОЛ}^{ОПР}$, при котором восходящее движение в парообразующих трубах сменяется опускаемым.

Расстояние между горизонтальной линией *ГД* и осью абсцисс выражает перепад давления в опускаемых трубах $\Delta p_{ОП} = S_{ПОЛ}^{КОНТ}$, который согласно уравнению циркуляции дает рабочую точку *А* диаграммы циркуляции.

По мере увеличения этого перепада давления (*линия ГД¹*) расход воды уменьшается, однако при низком давлении (диаграмма *а*) раньше наступает напор застоя и потому более вероятен застой циркуляции или свободный уровень в зависимости от способа подвода пароводяных струй в барабан, а при высоком давлении (диаграмма *б*) раньше достигается напор опрокидывания и потому более вероятно опрокидывание циркуляции.

Надежность циркуляции контуров проверяется по **критериям надежности**.

Проверка отсутствия нарушения циркуляции выполняется для труб с наименьшим обогревом. Производят проверку:

- застоя циркуляции

$$S_{\text{пол}}^{\text{заст}} / S_{\text{пол}}^{\text{конт}} > 1,1;$$

- опрокидывания циркуляции

$$S_{\text{пол}}^{\text{опр}} / S_{\text{пол}}^{\text{конт}} > 1,1;$$

- свободного уровня

$$(S_{\text{пол}}^{\text{заст}} - \Delta p_{\text{в.у}}) / S_{\text{пол}}^{\text{конт}} > 1,1,$$

где $\Delta p_{B.Y}$ – потеря напора на подъем смеси выше уровня воды в барабане $h_{B.Y}$.

Перечисленные явления крайне опасны, так как застой циркуляции или свободный уровень приводит к прекращению движения воды в контуре циркуляции, а опрокидывание циркуляции связано с переходом подъемного движения в опускное, т.е. с прохождением скоростей через нулевое значение. Все эти режимы приводят к нарушению устойчивого отвода теплоты от внутренней стенки парообразующих труб и возможности их перегрева.

28. Гидродинамика опускающих труб и ее влияние на надежность циркуляции.

Надежная работа подъемных труб циркуляционного контура обеспечивается непрерывной подачей к ним воды в необходимом количестве. Уменьшение подачи воды через опускные трубы при интенсивном обогреве подъемных труб приводит к недостаточному охлаждению и затем перегреву металла этих труб. Такая ситуация является аварийной, поскольку обычно она завершается разрывом обогреваемых парообразующих труб. При полном прекращении питания температура стенки обогреваемых труб может возрасти со скоростью $20 - 25 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Достаточно $10 - 15 \text{ с}$, чтобы в этих условиях вывести из строя агрегат.

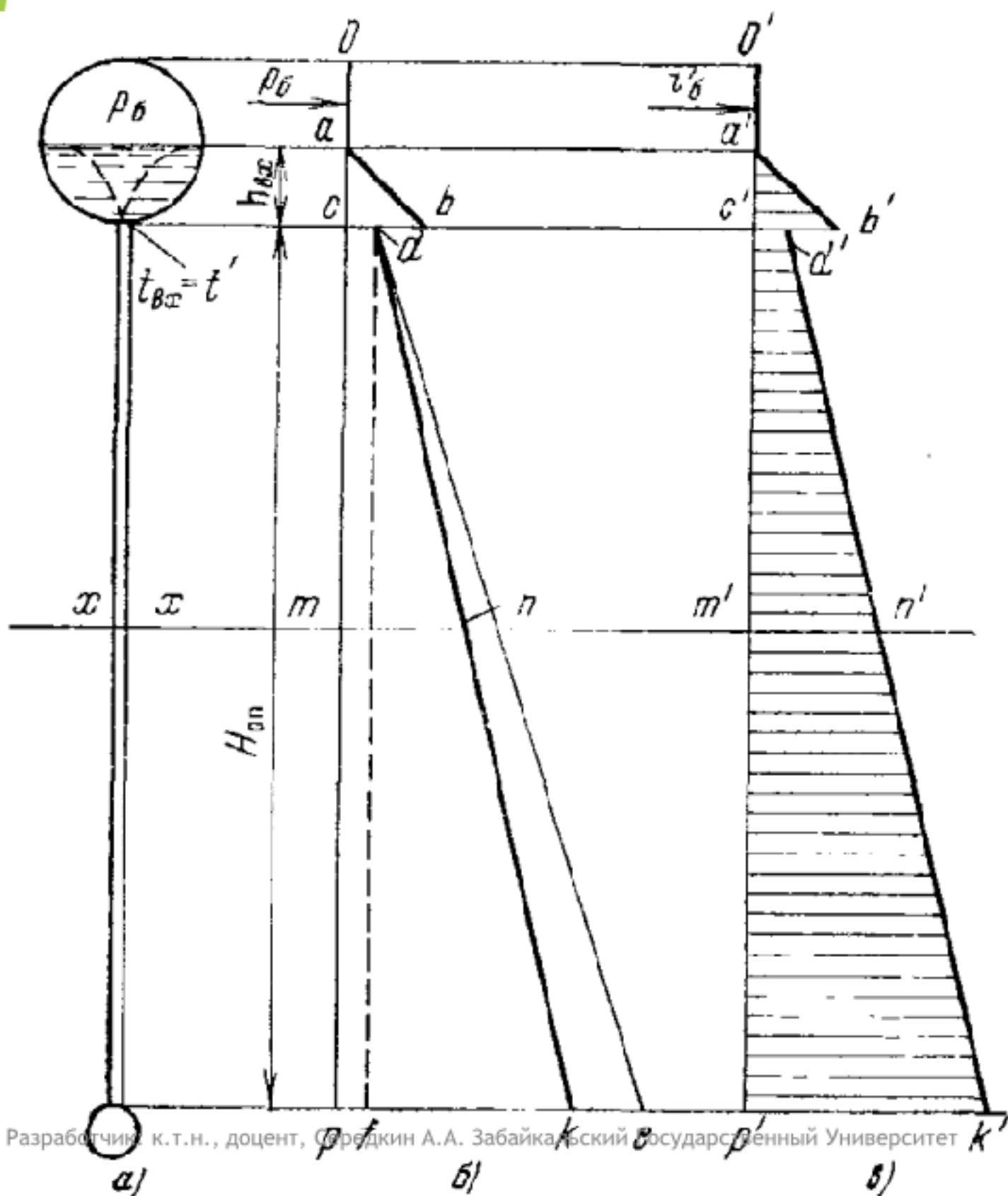
Недостаточный по условиям температурного режима парообразующих труб расход воды через опускные трубы вызывается либо их большим гидравлическим сопротивлением, либо захватом в них пара.

Гидравлическое сопротивление опускных труб

При анализе работы опускных труб различают два случая:

- подача воды из экономайзера в барабан при температуре насыщения (**кипящий экономайзер** $t_{ЭК}'' = t'$), рассматривать будем именно по этому распространенному случаю;
- подача воды при температуре, меньшей температуры насыщения (**некипящий экономайзер** $t_{ЭК}'' < t'$).

Гидравлическое сопротивление опускных труб



Распределение давления и соответствующей ему энтальпии воды на линии насыщения по высоте опускных труб

Гидравлическое сопротивление опускаемых труб

При кипящем экономайзере температура воды на входе в опускаемые трубы $t_{BX} = t'$ (рис. а). По пути движения воды в барабане до входа в опускаемые трубы ее скорость ничтожна и потому скоростным напором за счет непараллельности стенок барабана можно пренебречь.

Изменение давления возникает только вследствие роста гидростатического давления по линейному закону (линия а-в на рис. б).

На входе в опускаемые трубы давление больше, чем давление на уровне воды в барабане, на величину (отрезок в-с)

$$\Delta p_6^{\text{гидр}} = h_{\text{вх}} \rho' g.$$

Гидравлическое сопротивление опускных труб

При входе в опускные трубы скорость воды существенно возрастает, что связано с понижением статического давления как в следствие создания скоростного напора, так и из-за неизбежных потерь энергии на преодоление местных сопротивлений. В связи с этим давление на входе в опускные трубы уменьшится на (отрезок b-d).

$$\Delta p_{\text{вх}} = (1 + \xi_{\text{вх}}) \frac{w_{\text{оп}}^2}{2} \rho'.$$

Гидравлическое сопротивление опускных труб

При дальнейшем движении воды по опускным трубам давление снова возрастает вследствие увеличения гидростатического давления столба воды по линии d-e, достигая превышения давления по сравнению с давлением на входе на величину e-f:

$$\Delta p_{\text{оп}}^{\text{гидр}} = H_{\text{оп}} \rho' g,$$

а с учетом потери давления на преодоление сопротивления трения и в местных сопротивлениях

$$\Delta p_{\text{оп}} = \left[H_{\text{оп}} - \frac{w_{\text{оп}}^2}{2g} \left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \xi \right) \right] \rho' g,$$

где

$$\left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \xi \right) \frac{w_{\text{оп}}^2}{2g} < H_{\text{оп}}.$$

Гидравлическое сопротивление опускных труб

Из рис. следует, что при движении воды по опускным трубам давление неуклонно повышается, за исключением только на входе воды в опускные трубы, где имеет место некоторое понижение давления.

Однако если принять, что

$$\Delta p_{\text{гвдр}}^{\text{б}} > \Delta p_{\text{вх}},$$

т.е.

$$h_{\text{вх}} > (1 + \xi_{\text{вх}}) \frac{w_{\text{оп}}^2}{2g},$$

то, как следует из рис. б, давление воды в любой точке опускной системы будет превышать давление на уровне воды в барабане P_B .

Увеличивающемуся давлению отвечает соответствующее распределение энтальпии кипящей воды (а'-б'-д'-к', рис. в).

Действительная энтальпия воды в любом сечении опускных труб равна i_B' , отвечает давлению на уровне воды в барабане p_B и в отсутствии обогрева опускных труб постоянна (линия а'-р').

Гидравлическое сопротивление опускаемых труб

Горизонтальные участки, заключенные между этими линиями, выражают недогрев воды до кипения в соответствующих сечениях опускаемых труб; например недогрев до кипения в сечении $x-x$ выражается отрезком $m'-n'$. Следовательно, при выполнении условия

$$h_{вх} > (1 + \xi_{вх}) \frac{w_{оп}^2}{2g},$$

в необогреваемых опускаемых трубах закипание воды невозможно, а следовательно, и образование пара невозможно.

Гидравлическое сопротивление опускных труб

Если падение давления на входе в опускные трубы $\Delta p_{ВХ}$ будет равно или превышать $\Delta p_{Б}^{ГИДР}$, то в месте входа в опускные трубы давление воды понизится настолько, что она окажется перегретой при давлении в барабане и вскипит в зоне пониженного давления. Образовавшиеся пузырьки пара будут уноситься вместе с циркулирующей водой в опускные трубы, где давление выше и вода окажется недогретой до кипения и потому пузырьки пара сконденсируются. Для полной конденсации пара необходимо время. В результате пузырьки пара уносятся потоком воды довольно далеко и опускные трубы на значительном протяжении заполняются не водой, а пароводяной смесью. Заметно растет сопротивление опускных труб, несколько уменьшается движущий напор циркуляции. Наличие небольшого количества пара в опускных трубах не опасно.

Гидравлическое сопротивление опускных труб

Основными причинами появления пара в опускных трубах являются:

- увлечение циркуляционной водой пузырьков пара из водяного объема барабана;
- образование паровых воронок на входе в опускные трубы и прямое попадание через них пара из парового объема барабана.

Нормальное поступление воды в опускные трубы может нарушаться вследствие захвата в них пара из водяного объема барабана. Пузырьки пара, находящиеся под уровнем воды в барабане при значительной скорости ее потоков, движущихся к опускным трубам, не успевают выделиться и уносятся этими потоками в опускные трубы. Такие условия могут возникать, например, при близком расположении вводов парообразующих труб в барабане и выводов из него опускных труб.

Захват пара в опускные трубы предупреждают соответствующей организацией потоков воды, например установкой перегородок или сепарацией пароводяной смеси в циклонах.

Гидравлическое сопротивление опускаемых труб

Надежность парообразующих труб понижается при образовании пара в зоне пониженного давления на входе в опускаемые трубы, когда не выдерживается условие

$$h_{\text{вх}} > (1 + \xi_{\text{вх}}) \frac{w_{\text{оп}}^2}{2g},$$

В этом случае образовавшийся пар может соединиться с неизбежными углублениями уровня на зеркале испарения, образуя паровую воронку, через которую пар из парового объема барабана поступает в опускаемую систему уже в больших количествах, нарушая и расстраивая циркуляцию во всех контурах. Воронкообразование может происходить в котлах с естественной и принудительной циркуляцией. Для предотвращения этого явления создается определенный запас высоты уровня в барабане над входом в опускаемые трубы. Вероятность образования воронок возрастает с увеличением диаметра опускаемых труб.