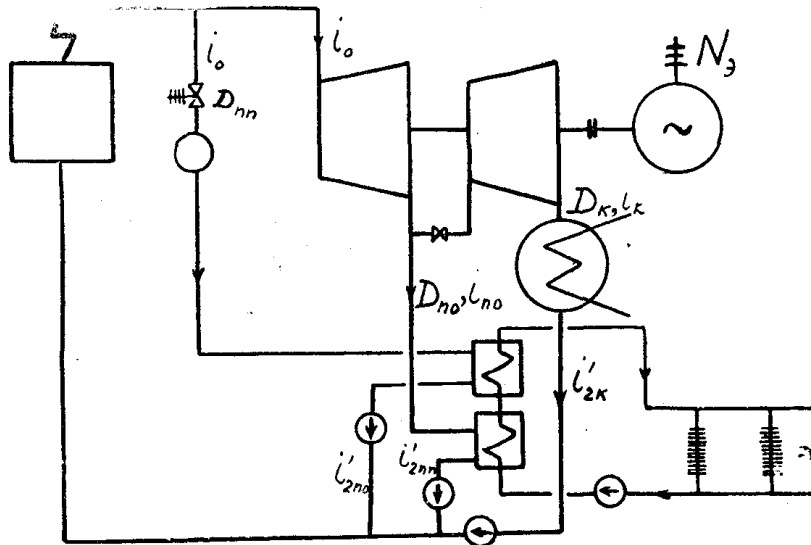


ДИАГРАММА „КОЛИЧЕСТВО—КАЧЕСТВО“ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ИЛЛЮСТРАЦИИ ИДЕЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В. Т. ЮРИНСКИЙ

При объяснении ряда положений современной теплотехники, например, при освещении вопроса о выгодах, предоставляемых теплофикацией, как правило, пользуются в преподавании $T-S$ диаграммой водяного пара.

В практике преподавания специальных курсов автор уже ряд лет применяет иной прием иллюстрации. Для этой цели используется диаграмма „количество—качество“, которая строится в координатах $i-D$. Эта диаграмма гораздо нагляднее, чем $T-S$; диаграмма показывает, в чем заключаются выгоды комбинированного процесса выработки электрической и тепловой энергии. При помощи этой диаграммы легко судить о том, как отражаются на экономичности работы отдельной станции или энергети-



Фиг. 1

ческой системы различные способы покрытия тепловых и электрических нагрузок, колебания нагрузки, колебания температуры наружного воздуха и т. д.

Рассмотрим следующий конкретный пример решения задачи энергоснабжения.

Тепловая электрическая станция, на которой установлена турбина с отбором пара (фиг. 1), обеспечивает энергоснабжение района. В рассматриваемый момент температура наружного воздуха низка, и поэтому сетевая вода подогревается в основном и пиковом подогревателях. Пиковый подогреватель получает редуцированный пар из котлов ТЭЦ, основной подогреватель питается паром из регулируемого отбора турбины. Пусть теплосодержание свежего пара — i_0 ; теплосодержание пара, поступающего в

Задачей теплофикации является возможно более полное вытеснение конденсационных киловаттчасов, т. е. развитие центрального потока. Для рассматриваемого момента тепловое потребление измеряется площадями, заштрихованными вертикально. Так как тепловое потребление не определяется режимом станции, величина его зависит от внешних условий, то есть от потребителей, то видно, что поток пара D_{np} является вынужденным потоком. Необходимость потока D_{np} определяется только тем, что в рассматриваемый момент необходимо нагревать воду в подающей магистрали сети до температуры более высокой, чем достижимая по параметрам отбора (или по количественным ограничениям отбора).

Если при заданном тепловом потреблении, то есть при заданной величине площади, отмеченной на диаграмме вертикальной штриховкой, удалось бы увеличить потребление пара из отбора, то при этом мы имели бы:

1) сокращение расхода редуцированного пара котлов на пиковый подогреватель,

2) увеличение выработки электроэнергии на тепловом потреблении (при неизменности i_o , i_{no} центральный поток D_{no} будет на диаграмме иметь большую ширину),

3) сокращение выработки электроэнергии конденсационным способом. Мы видим, что центральный поток пара, развиваясь, вытесняет как поток пара, обеспечивающий конденсационную выработку электроэнергии, так и поток пара, отбираемый непосредственно из котлов на удовлетворение теплового потребления.

Думается, что диаграмма „количество—качество“ является наглядным средством, позволяющим в доступнейшей форме иллюстрировать основные идеи теплофикации.

Но этим не исчерпываются иллюстративные достоинства предлагаемой диаграммы. В ней легко изобразить и электромеханические потери турбогенератора. В самом деле, эти потери представляют собою механическую энергию, полученную в турбине, но не отданную электрическим потребителям, а израсходованную на покрытие трения в подшипниках, на действие системы регулирования турбины, на нагрев обмоток генератора и т. д. Электрическая мощность связана с внутренне очевидным соотношением

$$N_{э} = \eta_2 \eta_m \cdot N_i.$$

Здесь

η_2 — к.п.д. генератора,

η_m — механический к.п.д. турбины.

Поскольку внутренняя мощность, определяемая потоком пара, работающего до давления в конденсаторе, будет выражена площадью прямоугольника $agdba$ (пл. $agdba = 860 N_{ik}$), то электромеханические потери этого потока могут быть изображены площадью прямоугольника $a_1gdb_1a_1$

$$\text{пл. } a_1gdb_1a_1 = (1 - \eta_2 \eta_m) \text{ пл. } agdba$$

$$860 N_{ik} (1 - \eta_2 \eta_m) = 860 N_{э.мк.},$$

где $860 N_{э.мк.} = 860 (N_{ik} - N_{э.к.})$ представляет собой мощность, затрачиваемую на покрытие электромеханических потерь потока.

Аналогично площадь прямоугольника $g_1eжд_1g_1$ измеряет электромеханические потери потока пара, отбираемого в промежуточной точке турбины,

$$\text{пл. } g_1eжд_1g_1 = 860 N_{э.п.о.} = (1 - \eta_2 \eta_m) N_{i.п.о.}$$

Пусть электрическая нагрузка составляет $N_э$ квт и тепловая $Q \frac{\text{мккал}}{\text{час}}$.

При этом

$$Q = Q_{on} + Q_{nn},$$

Q_{on} — тепловая нагрузка, которую можно покрыть за счет использования отбора (по количественному или качественному ограничению отбора),

Q_{nn} — тепловая нагрузка, которую необходимо покрывать за счет расхода редуцированного пара из котлов.

Электрическая мощность станции

$$N_{\Sigma} = N_{\Sigma k} + N_{\Sigma no}.$$

Количество пара, уходящего в отбор, определится как

$$D_{no} = \frac{Q_{on}}{i_{no} - i'_{2no}},$$

и электрическая мощность, обеспечиваемая за счет пара, отбираемого от турбины,

$$N_{эno} = \frac{D_{no} (i_0 - i_{no})}{860} \eta_m \eta_g.$$

Соответственно найдем

$$N_{эk} = N_{э} - N_{эno},$$

откуда расход пара на конденсационный поток

$$D_k = \frac{860 N_{эk}}{(i_0 - i_k) \eta_m \eta_g} = \frac{860}{(i_0 - i_k) \eta_m \eta_g} (N_{э} - N_{эno}).$$

Так же легко определяется и необходимая величина D_{nn} , то есть расход пара на пиковый подогреватель

$$D_{nn} = \frac{Q_{nn}}{i_0 - i'_{2nn}} = \frac{Q - Q_{on}}{i_0 - i'_{2nn}}.$$

Если электрическая нагрузка сохраняется неизменной, но тепловое потребление, покрываемое паром из отбора, растет, то поток D_{no} развивается, вытесняя конденсационный поток, то есть конденсационная выработка электроэнергии сокращается, что весьма наглядно отражается и на диаграмме.

При перераспределении тепловой нагрузки между пиковым и основным подогревателями происходит перераспределение расходов пара D_{no} и D_{nn} , что вновь наглядно отражается в диаграмме и вновь приводит к изменению соотношения в выработке электроэнергии конденсационным и теплофикационным процессами.

Диаграмма $i-D$ с успехом может быть использована и для иллюстрации вопроса о распределении потерь и экономичности работы сложной электроэнергетической системы, включающей в себе ТЭЦ, КЭС и ГЭС. Здесь мы должны отразить выработку энергии по следующим статьям:

1) выработка электроэнергии и покрытие теплотребления теплофикационным способом;

2) выработка электрической энергии конденсационным способом;

3) выработка тепловой энергии для покрытия теплотребления за счет редуцированного пара из котлов;

4) выработка электроэнергии на гидроэлектростанциях.

Пусть система состоит из 1 ТЭЦ и 1 ГЭС.

Пусть электрическая нагрузка, обеспечиваемая системой,

$$N_{э} = N_{эk} + N_{эno} + N_{э}^{ГЭС}.$$

Здесь $N_9^{ГЭС}$ — нагрузка, покрываемая гидроэлектростанцией.
 Электрическая мощность ГЭС

$$N_9^{ГЭС} = \frac{1000 W \cdot H}{3600 \cdot 102} \eta_{гТ} \cdot \eta_{м}^{гТ} \cdot \eta_{г}^{гТ},$$

W — расход воды через турбины $м^3/час$,

H — напор (располагаемый) $м$,

$\eta_{гТ}$ — к.п.д. гидротурбин,

$\eta_{м}^{гТ}, \eta_{г}^{гТ}$ — механический к.п.д. гидротурбины и к.п.д. гидрогенератора.

Выражая мощность ГЭС в электрических калориях, можно написать:

$$860 N_9^{ГЭС} = \frac{D_{гЭС} \cdot H}{427} \eta_{гТ} \eta_{м}^{гТ} \cdot \eta_{г}^{гТ},$$

$D_{гЭС}$ — расход воды в $кг/час$,

$\frac{H}{427} \eta_{гТ}$ — условный „телоперепад“ ГЭС, выраженный в $ккал/кг$.

При построении прямоугольника, площадь которого выражает $860 N_9^{ГЭС}$ в координатах $i—D$, удобнее масштаб ординат (то есть $\eta_{гТ} \frac{H}{427} = (\Delta i)_{усл}$)

увеличить в 427, 4270..... раз, а масштаб абсцисс для величины $D_{гЭС}$ уменьшить в 427, 4270..... раз, чтобы получился прямоугольник, не очень растянутый по оси абсцисс. Понятно, что площадь прямоугольника от этого не изменится. Можно изменить масштабы и в другое одинаковое число раз в зависимости от величин расхода воды и напора.

Тогда диаграмма, характеризующая выработку энергии различными агрегатами системы, будет иметь вид, изображенный на фиг. 3. При построении диаграммы „условный перепад теплосодержаний“ гидротурбины откладываем от оси абсцисс.

Такая диаграмма чрезвычайно наглядна. Ничто не мешает нам в прямоугольниках 8, 9 выделить прямоугольники $(1-\eta_{ТС}) \cdot пл. 8$, $(1-\eta_{ТС}) \cdot пл. 9$ для того, чтобы отразить потери тепловой сети. Аналогично в прямоугольниках 1, 2, 3 могут быть выделены прямоугольники $(1-\eta_9^{CH}) \cdot пл. 1$ и т. д., показывающие затрату электроэнергии на электрические собственные нужды. Можно выделить также потери в электрических сетях. Число отдельных потоков в диаграмме не ограничивается. Поэтому с учетом конкретной обстановки могут быть построены рядом друг с другом диаграммы $i—D$ для всех станций, входящих в систему.

В случае совместной работы ТЭЦ и ГЭС мы различаем 4 потока.

1. Конденсационный поток. Наличие его приводит к большим потерям. Здесь есть и электромеханические и тепловые потери. Развитие этого потока не выгодно.

2. Поток теплофикационный. Здесь имеются только электромеханические потери и потери тепловых и электрических сетей (включая сюда и расход электроэнергии на собственные нужды). Этот поток необходимо и выгодно развивать, так как необходимо обеспечивать и тепловое и электрическое потребление в конкретных условиях энергетического района.

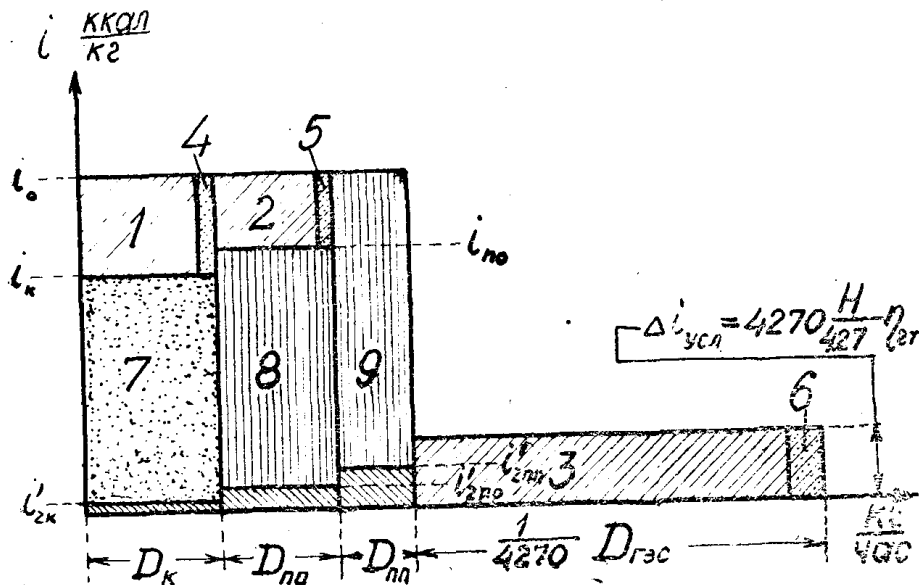
3. Поток ГЭС. Электрическая энергия вырабатывается без затраты топлива, то есть нет тепловых потерь, а существуют лишь электромеханические и потери в сетях, включая сюда и затрату электроэнергии на собственные нужды. Этот поток выгоден. Надо, теоретически рассуждая, его развивать для вытеснения конденсационных киловаттчасов. Но развивать этот поток можно лишь постольку, поскольку это необходимо для вытеснения конденсационных киловаттчасов. Вытеснение теплофикационных

киловаттчасов сейчас же приводит к развитию четвертого потока—потока редуцированного пара и может привести к перерасходу топлива.

Таким образом, потепление погоды при отопительном теплоснабжении должно стимулировать передачу нагрузки на ГЭС.

4. Поток пикового пара. Должен быть развит только в той мере, насколько это необходимо для удовлетворения теплового потребления. Этот поток является потоком вынужденным.

Как видим, $i-D$ диаграмма прекрасно иллюстрирует основные идеи современной энергетики. Легко отобразить при помощи ее и выработку



Фиг. 3

1 — 850 $N_{вк}$
 2 — 860 $N_{эпо}$
 3 — 860 $N_{ГЭС}$ } выработка электроэнергии

4 — $(1 - \eta_{лм} \eta_{г2}) 860 N_{эм}$
 5 — $(1 - \eta_{лм} \eta_{г2}) 860 N_{эпо}$
 6 — $(1 - \eta_{лм}^{2T} \eta_{г2}^{22}) 860 N_{ГЭС}$ } электромеханические потери

7 — Потери с охлаждающей водой в конденсаторе.
 8 — Выработка тепла за счет отбора пара.
 9 — Выработка тепла за счет редуцированного пара.

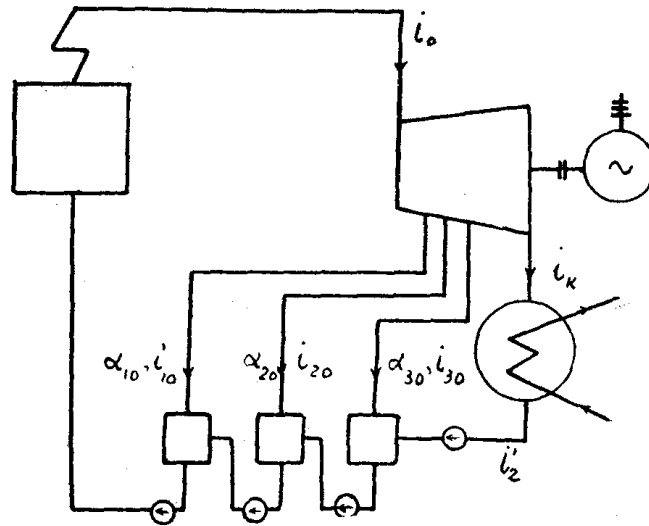
энергии на гидроэлектростанциях, наглядно показав, как отражается на тепловых потерях выработка электроэнергии без затрат топлива за счет использования „белого угля“.

Используем ту же диаграмму для иллюстрации выгод регенеративного подогрева воды на паровых электростанциях.

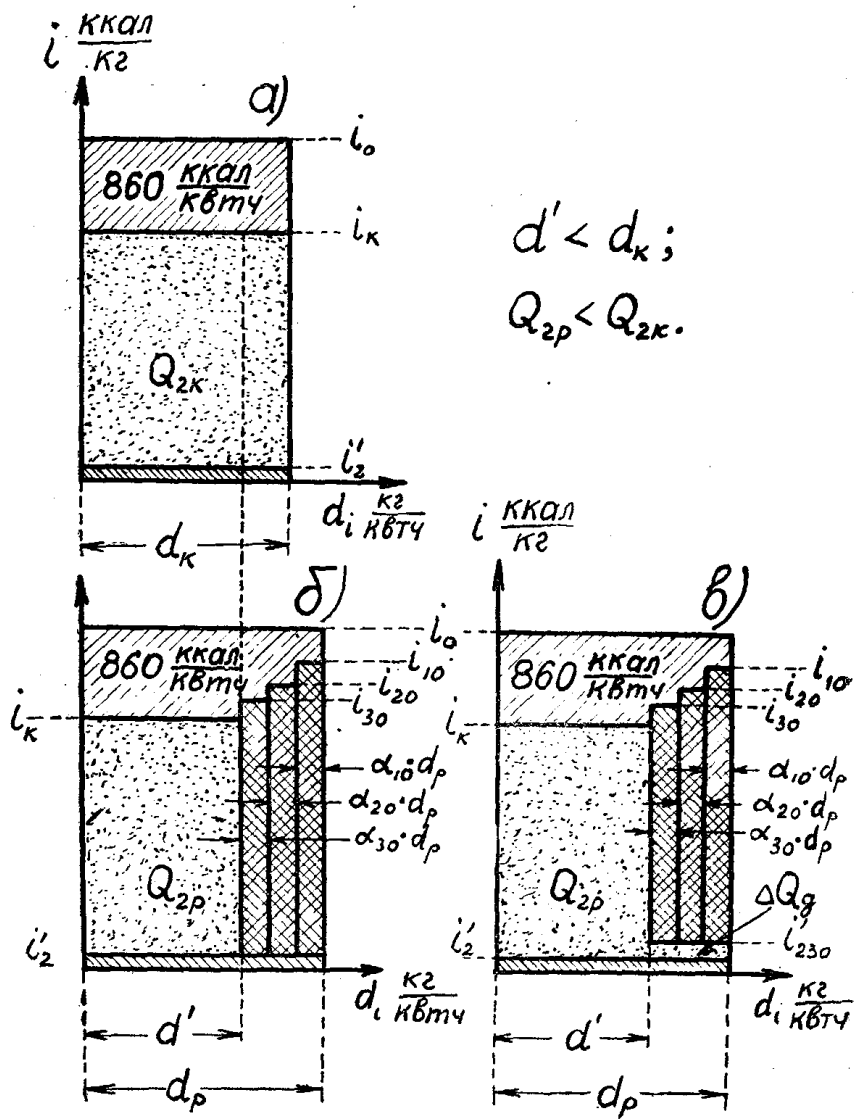
Сравним между собою две турбинные установки. Одна из них устаревшего типа, без регенеративного подогрева питательной воды. Вторая имеет регенеративный подогрев за счет использования трех точек промежуточного отбора пара. Подогрев воды производится в смешивающих подогревателях по схеме, показанной на фиг. 4.

Обе установки одинаковы по мощности и имеют одинаковые значения величин $\eta_{лм}$, $\eta_{г2}$, i_0 , i_k . Для того чтобы показать, насколько гибок метод иллюстрации при помощи $i-D$ диаграммы, проведем построение диаграммы на 1 квтч внутренней мощности турбины, то есть построим диаграмму в координатах $i-d$, где d —удельный расход пара на киловаттчас.

Для конденсационной установки без регенерации диаграмма будет очень проста (фиг. 5а).



Фиг. 4



Фиг. 5

Превратилось в механическую работу

$$d_k(i_0 - i_k) = 860 \text{ ккал/квтч.} \quad (1)$$

Потеряно с охлаждающей водой

$$d_k(i_k - i_2') \text{ ккал/квтч.}$$

Возвращено с питательной водой

$$d_k i_2' \text{ ккал/квтч.}$$

Для установки с регенерацией уравнение энергетического баланса в расчете на киловаттчас внутренней мощности принимает вид

$$d_p(1 - \alpha_{10} - \alpha_{20} - \alpha_{30})(i_0 - i_k) + d_p \alpha_{10}(i_0 - i_{10}) + d_p \alpha_{20}(i_0 - i_{20}) + \\ + d_p \alpha_{30}(i_0 - i_{30}) = 860 \frac{\text{ккал}}{\text{квтч}}$$

После несложных преобразований

$$860 = d_p(i_0 - i_k) \left(1 - \alpha_{10} \frac{i_{10} - i_k}{i_0 - i_k} - \alpha_{20} \frac{i_{20} - i_k}{i_0 - i_k} - \alpha_{30} \frac{i_{30} - i_k}{i_0 - i_k} \right); \\ 860 = d_p(i_0 - i_k) \left(1 - \sum \alpha_{m0} \frac{i_{m0} - i_k}{i_0 - i_k} \right). \quad (2)$$

Из сравнения (1) и (2) получим

$$d_k(i_0 - i_k) = d_p(i_0 - i_k) \left(1 - \sum \alpha_{m0} \frac{i_{m0} - i_k}{i_0 - i_k} \right); \\ d_p = \frac{d_k}{1 - \sum \alpha_{m0} \frac{i_{m0} - i_k}{i_0 - i_k}}$$

Здесь i_{10}, i_{20} — ккал/кг теплосодержания пара в точках отбора, α_{10}, α_{20} — долевые коэффициенты отборов.

Мы видим, что $d_p > d_k$, что и понятно, ибо часть пара работает в турбине с регенерацией не до конечных параметров. Но потери тепла с охлаждающей водой в турбине без регенерации будут больше. Эти потери:

а) для турбины без регенерации

$$Q_{2k} = d_k(i_k - i_2') \dots \frac{\text{ккал}}{\text{квтч}},$$

б) для турбины с регенерацией

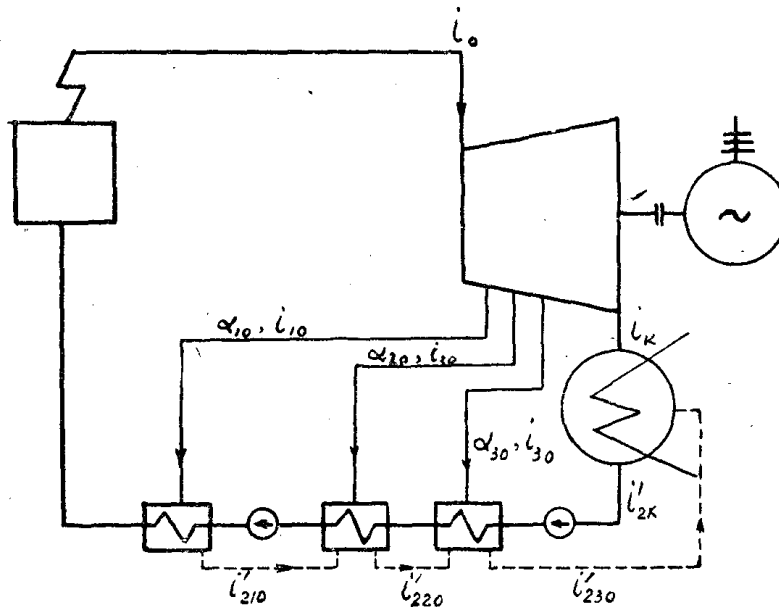
$$Q_{2p} = d_p(1 - \sum \alpha_{m0})(i_k - i_2') = d_k(i_k - i_2') \frac{1 - \sum \alpha_{m0}}{1 - \sum \alpha_{m0} \frac{i_{m0} - i_k}{i_0 - i_k}}$$

(см. фиг. 5б)

$$\frac{Q_{2p}}{Q_{2k}} = \frac{1 - \sum \alpha_{m0}}{1 - \sum \alpha_{m0} \frac{i_{m0} - i_k}{i_0 - i_k}} < 1.$$

На $i-d$ диаграммах двух сравниваемых турбин это отразится тем, что площадь треугольника, изображающая потери турбины с регенерацией, будет меньше, чем площадь, изображающая потери турбины без регенерации (при одинаковой высоте обоих этих прямоугольников ширина их будет неодинакова). Это видно и без выкладок. В самом деле, количество тепла, превращенное в механическую энергию, в обоих случаях одно и то же: 860 ккал/квтч , то есть площади, отмеченные косой штриховкой с наклоном влево, должны быть равновелики. Отсюда с неизбежностью вытекает, что для турбины с регенерацией площадь прямоугольника, изображающего потери, будет меньше.

Заметим, что выгоды регенерации можно было бы показать и в диаграмме $i-D$, а не в $i-d$, как это сделано нами. При помощи $i-d$ диаграммы легко, например, показать, какую роль играет схема включения подогревателей при регенеративном подогреве воды. Пусть долевые коэффициенты отборов $\alpha_{10}, \alpha_{20} \dots$ остались неизменными. Пусть неизменны и



Фиг. 6

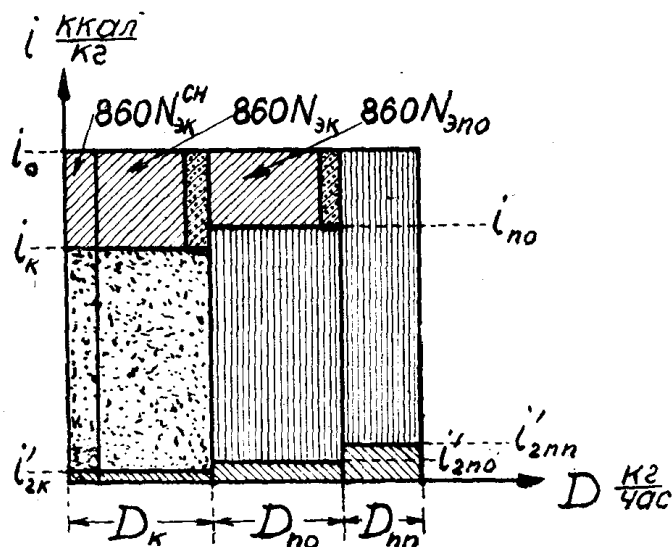
$i_{10}, i_{20} \dots$. Но регенеративный подогрев воды осуществляется не по схеме, показанной на фиг. 4, а в поверхностных подогревателях при довольно обычном каскадном удалении дренажей из подогревателей (фиг. 6), то есть с отводом всех дренажей из подогревателя низкого давления в конденсатор. Как показано на фиг. 5 в, в этом случае количество тепла, потерянное дополнительно на каждый внутренний киловаттчас, составит

$$\Delta Q_c = d_p \sum \alpha_{m0} (i'_{230} - i'_{2k}) \frac{\text{ккал}}{\text{квтч}},$$

что легко отразить и в диаграмме $i-d$ (фиг. 5в).

При помощи $i-D$ диаграммы можно наглядно осветить некоторые моменты, не поддающиеся рассмотрению при употреблении обычных методов иллюстрации. Например, рассматривая вопрос о теплоносителе в тепловых сетях, мы легко приходим к выводу, что электроэнергия, необходимая для осуществления циркуляции воды в сетях, производится конденсационным процессом. В самом деле, применяя воду как теплоноситель, мы должны кроме покрытия нагрузок района (включая сюда и электрические собственные нужды станции) вырабатывать электроэнергию для сетевых

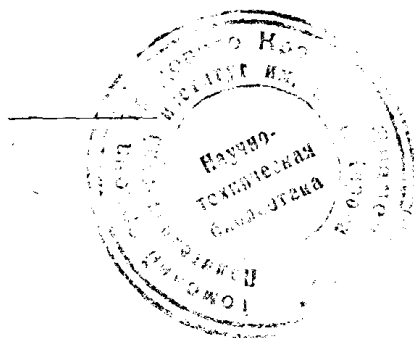
насосов. Тепловое потребление района не зависит от того, каков теплоноситель в сети. Поэтому на тепловом потреблении района теплофикационным способом можно выработать лишь ограниченное количество электроэнергии, определяемое величиной D_{no} , то есть определяемое тепловым потреблением за счет использования отбора. Добавочные киловаттчасы на сетевые насосы будут вырабатываться конденсационным процессом (см.



Фиг. 7

фиг. 7). На диаграмме это выразится увеличением ширины потока D_k , так как необходимо обеспечить конденсационную добавочную выработку $860 N_{эк}^{сн}$, где $N_{эк}^{сн}$ — мощность, потребляемая сетевыми насосами.

Выводы, кот рые, нам кажется, следует сделать, должны быть таковы. Наглядность иллюстраций, простота доказательств, использование минимума понятий при сохранении необходимой ясности, рассмотрение явлений и процессов в их развитии должны быть основой методики преподавания в советской высшей школе. Нам приходилось слышать возражения против применения $i-D$ диаграммы. Основой этих возражений было то, что $T-S$ диаграмма предложена для иллюстраций и расчетов современниками Клаузиуса (Стодола полагает, что $T-S$ диаграмма впервые была использована Бельпером в 1873 году) и что поэтому отказ от иллюстративного использования $T-S$ диаграммы является недопустимым нарушением привычных канонов технической термодинамики. Поскольку для расчетов по процессам паросиловых установок $T-S$ диаграммой никто не пользуется и использование ее ограничивается чисто иллюстративными целями, мы полагаем, что $i-D$ диаграмма как иллюстрация имеет перед $T-S$ диаграммой несомненные преимущества, так как позволяет иллюстрировать и качественную и количественную стороны процессов, происходящих в энергетических установках, причем чрезвычайно просто показывает взаимосвязь различных способов производства энергии в ее развитии и в зависимости от существующих внешних условий, определяемых соотношением электрического и теплового потребления.



ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует
24	2 снизу	$\gamma_r = S \cdot P$	$\gamma_r = S P_r$
41	4 сверху	цитированная	цитированная
57	5 сверху	термо-и гидродинамические	термо- и гидродинамические
69	11 снизу	теплоносителя	теплоносителя
85	10 снизу	$\frac{dV}{d\alpha} =$	$0 = \frac{dV}{d\alpha} =$
102	17 снизу	бессейнов	бассейнов
178	фиг. 1	в процесс	в процессе
185	14, 15, 17 снизу	э	ε
204	7 сверху	огд	год
210	6 снизу	где 860 $N_{\text{mk}} = 860 (N_{ik} - N_{\text{k}})$	где 860 $N_{\text{эмк}} = 860 (N_{ik} - N_{\text{эк}})$
211	9 сверху	$N_{\text{к}} = N_{\text{k}} + N_{\text{по}}$	$N_{\text{э}} = N_{\text{эк}} + N_{\text{по}}$
211	18 сверху	$D_k = \frac{860 N_{\text{k}}}{(i_0 - i_k) \eta_m \eta_z} =$	$D_k = \frac{860 N_{\text{эк}}}{(i_0 - i_k) \eta_m \eta_z} =$