

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА ЗОНЫ НАГРЕВАНИЯ В КОНДЕНСАТОРАХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ЗАДАННОМ ВАКУУМЕ

И. Н. БУТАКОВ

Как известно, температура пара при входе в конденсатор

$$t_k = t_1 + (\delta t) + (t_k - t_2),$$

где  $t_1$  — температура циркуляционной воды на входе;

$$\delta t = t_2 - t_1$$

разность температур этой воды на выходе  $t_2$  и входе, а разность  $(t_k - t_2)$  может быть выбрана из таблицы Гебгардта. Эта таблица на рис. 1 дана в графическом изображении. Из рис. 1 видно, что  $(t_k - t_2)$  увеличивается вместе с понижением  $t_1$ . Формула Гебгардта для общего коэффициента  $k$  теплопередачи в конденсаторах  $k = 460 \sqrt{t_1 + 17,8} \cdot \sqrt{c_w}$

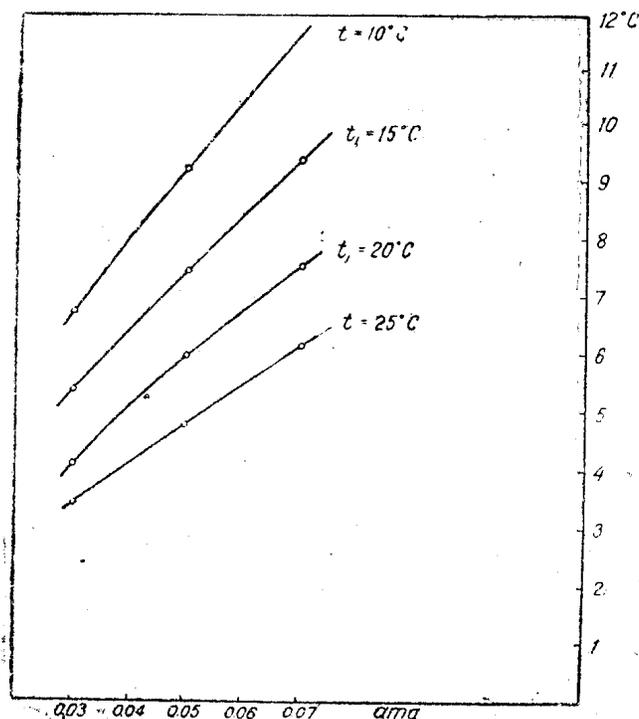


Рис. 1

показывает, что  $k$  уменьшается с понижением  $t_1$ , почему разность  $(t_k - t_2)$  должна возрастать, чтобы обеспечить охлаждающее действие воды до са-

мого конца при возрастающем тепловом сопротивлении трубок конденсатора. Общий коэффициент теплопередачи по формуле, лишь грубо отражающей

действительность (Гэй и Уинстенлей),  $k = 935 \sqrt{c_w} \cdot \sqrt{t_b + 17,8}$  зависит от  $t_b$  средней температуры воды в трубках конденсатора, уменьшаясь с этой величиной. Об этом же говорят и кривые Игла и Фергюссона для  $\alpha_b$  — коэффициента теплоперевода от стенки трубки к воде [1]. Средняя температура воды в трубках конденсатора понижается вместе с понижением  $t_1$ . Из сказанного вытекает, что уменьшение  $t_1$  должно неизбежно увеличивать тепловое сопротивление трубок конденсатора и вызывать необходимость увеличения  $(t_k - t_2)$  при заданном вакууме. Это подтверждается также графиком ВТИ, рис. 2, приведенном в „Руководящих указаниях по эксплуатации брызгальных бассейнов“ (ГЭИ, Москва,

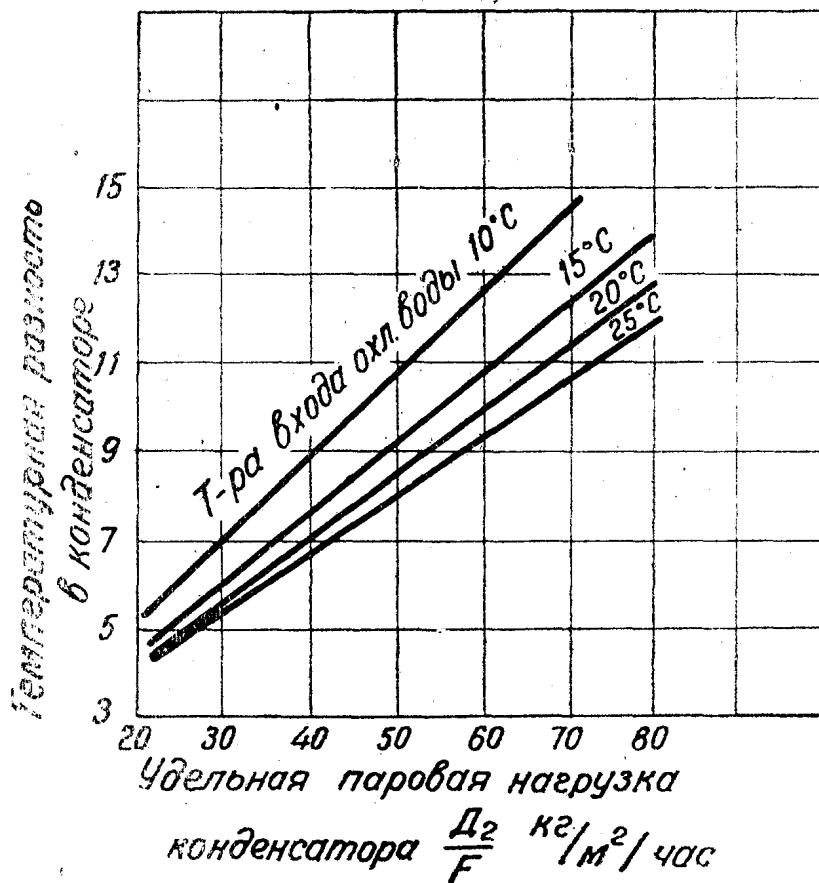


Рис. 2

1944, стр. 44), причем эта „температурная разность“ оказывается здесь даже более значительной, чем у Гебгардта, ибо обычно принимается для паровых турбин средних и больших мощностей удельная паровая нагрузка от 50 до 60 кг пара в час на 1 кв м поверхности охлаждения [2].

Гораздо больше трудностей представляет определение величины  $\delta t = t_2 - t_1$ , как видно будет из нижеследующего. Существенным здесь является вопрос, какое количество ходов должен иметь конденсатор: величина  $\delta t$  возрастает с числом  $z$  ходов. Это связано в свою очередь с кратностью охлаждения, затратой мощности на подачу циркуляционной воды, а также с капитальными вложениями в конденсационную установку.

Количество циркуляционной воды, подаваемой в конденсатор, определяется по общеизвестной формуле в кг/час

$$W = \frac{i_2 - t_k}{t_2 - t_1} \cdot D = \frac{\Delta i}{\delta t} \cdot D. \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что расход циркуляционной воды, будучи зависим от  $\Delta i = i_2 - t_k$  и  $D$  — часового расхода пара в кг, как функции вакуума, зависит в то же время и от  $\delta t$ . Для каждого заданного вакуума должна быть своя наивыгодная разность температур  $\delta t$ , к определению которой и переходим.

Сопrotивление конденсатора со стороны воды может быть определено по употребительной формуле

$$H_k = z \left( 0,031 \cdot \frac{L}{d_1} \cdot \frac{c_w^2}{2g} \beta + 1,4 \cdot \frac{c_w^2}{2g} \right). \quad (2)$$

Здесь первое слагаемое характеризует фрикционные сопротивления внутри трубок конденсатора, а второе — сопротивления входа и выхода;  $\beta$  — коэффициент, учитывающий влияние средней температуры и скорости воды. Определяем из уравнения сплошности движения

$$c_w = \frac{W}{9 \cdot 10^5 \cdot \pi d_1^2 \cdot n_1} = \frac{D \cdot \Delta i}{9 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot d_1^2 \cdot n_1 \cdot \delta t},$$

где  $n_1$  число трубок в одном ходе. Примем  $c_w = \text{const}$  при всех вариантах расчетов, чтобы приблизиться к сохранению неизменным коэффициента теплопередачи.

Тогда

$$n_1 = \frac{n}{z} = \frac{D \cdot \Delta i}{9 \cdot 10^5 \cdot \pi d_1^2 \cdot c_w \cdot \delta t}. \quad (3)$$

Так как поверхность охлаждения конденсатора

$$F = \pi \cdot d_1 \cdot L \cdot n_1 \cdot z = \frac{W}{k} \cdot \ln \frac{t_s - t_1}{t_s - t_2},$$

то

$$n_1 = \frac{F}{\pi d_1 L z} = \frac{D \cdot \Delta i}{\delta t \cdot k \cdot \pi d_1 \cdot L \cdot z} \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t},$$

где  $t_s$  температура насыщенного пара при давлении конденсатора  $p_k$ . Приравнявая (3) и (4), имеем

$$\frac{D \cdot \Delta i}{9 \cdot 10^5 \cdot \pi d_1^2 \cdot c_w \cdot \delta t} = \frac{D \cdot \Delta i}{\delta t \cdot k \cdot \pi d_1 \cdot L z} \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t},$$

откуда после необходимых сокращений определяем

$$Lz = \frac{9 \cdot 10^5 \cdot d_1 \cdot c_w}{k} \cdot \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t} = \rho_1 \cdot \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t},$$

где

$$\rho_1 = \frac{9 \cdot 10^5 \cdot d_1 \cdot c_w}{k},$$

и, следовательно,  $z = \frac{\rho_1}{L} \cdot \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t}$ .

Подставляя значения  $z$  и  $Lz$  в формулу (2), получим

$$H_k = \frac{c_w^3}{2gk} \cdot \rho_2 \cdot \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t},$$

где

$$\rho_2 = 9 \cdot 10^5 \left( 0,031 \cdot \beta + \frac{1,4 \cdot d_1}{L} \right).$$

Количество *квтч*, затрачиваемых в год на преодоление сопротивлений конденсатора, будет

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= A \cdot N_1 = \frac{W \cdot H_k \cdot A}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot \eta_n} = \\ &= \frac{\Delta i \rho_2 \cdot c_w^3 \cdot \mathcal{E} \cdot d_{\mathcal{E}}}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot 2g \cdot \eta_n \cdot k \cdot \delta t} \cdot \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mathcal{E}$  — годовая выработка *квтч* станцией,  $\eta_n$  — к.п.д. насосного агрегата,  $A$  — коэффициент использования оборудования час/год. Только что сделанный вывод принадлежит бывшему доценту кафедры теплосиловых установок Томского политехнического института Н. И. Анастасиевой.

Но циркуляционные насосы преодолевают не только сопротивления конденсатора, как такового, но и трубопроводов, присоединенных к конденсатору и циркуляционным насосам, включая потерю напора при входе воды в водяную камеру конденсатора. Мощность в *квт*, затрачиваемая на преодоление всех этих последних сопротивлений, определяется

$$N_2 = \frac{W_1 H}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot \eta_n},$$

где  $H$  представляет собой суммарный напор, преодолеваемый циркуляционными насосами, за вычетом вышеуказанных сопротивлений конденсатора. Поэтому годовую затрату *квтч* по этой статье можно было бы оценить, как

$$\mathcal{E}_2 = \frac{W \cdot H \cdot A}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot \eta_n} = \frac{\Delta i \cdot H \cdot \mathcal{E} \cdot d_{\mathcal{E}}}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot \eta_n \cdot \delta t}. \quad (6)$$

Циркуляционную воду надо подать от источника водоснабжения до конденсаторов, для чего нередко приходится ставить центральную насосную станцию, которая одновременно обычно подает необходимую воду для охлаждения генераторов и маслоотделителей в количестве от 4 до 8% расхода циркуляционной воды для конденсаторов, как таковых. Поэтому количество годовых *квтч*, затрачиваемых на перекачку воды, будет

$$\mathcal{E}_2 = \frac{1,08 \cdot W \cdot H \cdot A}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot \eta_n},$$

где  $H$  в м вод. ст. общий вышеуказанный преодолеваемый напор, зависящий как от нивелирной высоты подачи воды от источника водоснабже-

ния к конденсатору, так и от фрикционных и местных сопротивлений водовода. Поэтому, если  $H_1$  нивелирный напор, а  $H_2$  напор, обусловленный сопротивлением водовода, то

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_2 = & \frac{1,08 \cdot W (H_1 + H_2) A}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot \eta_{\kappa}} = \frac{1,08 \cdot H_1 \cdot A \cdot W}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot \eta_{\kappa}} + \\ & + \frac{1,08 \cdot A \cdot \lambda \cdot L_{\text{вод}} \cdot c_{\text{вод}}^2 \cdot W}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot \eta_{\kappa} \cdot 2g \cdot d}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $L_{\text{вод}}$  — эквивалентная длина водовода в м,  $d$  — диаметр водовода в м, а  $c_{\text{вод}}$  — скорость воды в нем в м/сек; грубо приближенно, простоты ради, принимается  $\lambda = 0,03$ . Полагая при расчете всех вариантов  $c_{\text{вод}} = \text{const}$ , определяем из уравнения сплошности

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,08 \cdot W}{2 \cdot 3600 \cdot 1000 \cdot \pi \cdot c_{\text{вод}}}},$$

считая, что в целях обеспечения надежности водоснабжения в работе будут находиться две нитки водовода. Вставляя это значение в выражение (7), получаем

$$\mathcal{E}_2 = \frac{1,08}{3600 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot \eta_{\kappa}} \left[ \frac{\Delta i \cdot d_{\text{э}} \cdot \mathcal{E} \cdot H_1}{\delta t} + \frac{3,5 \cdot A^{0,5} \cdot L_{\text{э}} \cdot c_{\text{вод}}^{2,5} (\Delta i \cdot d_{\text{э}} \cdot \mathcal{E})^{0,5}}{(\delta t)^{0,5}} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, полный годовой расход в рублях, причиняемый перекачкой воды, по статье расхода топлива выразится

$$R_{\text{ис}} = \frac{860 (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2)}{\eta_{\kappa} \cdot Q_{\text{п}}^{\text{н}}} \left( 1 + \frac{\Sigma \Delta}{100} \right) \frac{R_t}{1000}, \quad (9)$$

где  $R_t$  — стоимость тонны топлива в рублях, а  $\left( 1 + \frac{\Sigma \Delta}{100} \right)$  — хозяйственный коэффициент.

При рассмотрении вариантов приходится принимать во внимание денежные расходы именно по статье топлива, так как прочие эксплуатационные расходы можно считать неизменными.

Переходим теперь к оценке расходов, зависящих от основных фондов. Так как

$$F = \frac{W}{k} \cdot \ln \frac{t_s - t_1}{t_s - t_2} = \frac{\Delta i \cdot D}{k \cdot \delta t} \cdot \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t},$$

то  $F = f(\delta t)$ . Ежегодные отчисления по статье основных фондов составят для конденсатора

$$R_k^k = \frac{F \cdot u}{100} \cdot \left( \frac{S_k}{F} \right),$$

где  $\frac{S_k}{F}$  стоимость кв. м поверхности охлаждения конденсатора руб/м<sup>2</sup>, а

$u$  — отчисления в процентах, так что

$$R_k^k = \frac{\Delta i \cdot D \cdot u}{100 \cdot k \cdot \delta t} \left( \frac{S_k}{F} \right) \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t} =$$

$$= \frac{\Delta i \cdot \mathcal{E} \cdot u \cdot d_3}{100 \cdot A \cdot k \cdot \delta t} \left( \frac{S_k}{F} \right) \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t} \quad (10)$$

С другой стороны, для водовода имеем стоимость одного пог. м. в укладке в рублях

$$S_{вод} = a + b \cdot d = a + b' \sqrt{\frac{D \cdot \Delta i}{c_{вод} \cdot \delta t}},$$

где  $a$ ,  $b$  и  $b'$  — величины, которые могут быть приняты постоянными в известных пределах изменения  $d$  и которые учитывают укладку двойного водовода. Сумма ежегодных отчислений по водоводу

$$R_k^{вод} = \frac{S_{вод} \cdot u \cdot L_0}{100} = \frac{u \cdot L_0}{100} \left( a + b' \sqrt{\frac{\Delta i \cdot d_3 \cdot \mathcal{E}}{c_{вод} \cdot \delta t \cdot A}} \right),$$

где  $L_0$  фактическая длина водовода в м. Стоимость насосной станции  $S_{нас} = f \cdot N_{нас}$  принимается пропорциональной ее мощности  $N_{нас}$ , где  $N_{нас}$  в л. с., а  $f$  — численный коэффициент, представляющий стоимость машин на 1 л. с. с полной установкой, фундаментами, а также стоимостью помещений.

$$\begin{aligned} R_k^{нас} &= \frac{S_{нас} \cdot u}{100} = \frac{1,36 \cdot u \cdot f}{100} (N_1 + N_2) = \\ &= \frac{1,36 \cdot u \cdot f}{100} \left[ \frac{\Delta i \cdot \rho_2 \cdot c_w^3 \cdot \mathcal{E} \cdot d_3}{3600 \cdot 75 \cdot 2g \cdot \eta_n \cdot k \cdot A \cdot \delta t} \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t} + \right. \\ &\left. + \frac{1,08 \cdot H_1 \cdot \Delta i \cdot \mathcal{E} \cdot d_3}{3600 \cdot 75 \cdot \eta_n \cdot A \cdot \delta t} + \frac{1,08 \cdot 3,5 \cdot L_3 \cdot c_w^{2,5} (\Delta i \cdot d_3 \cdot \mathcal{E})^{0,5}}{3600 \cdot 75 \cdot \eta_n \cdot (A \cdot \delta t)^{0,5}} \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

Итак, сумма годовых денежных расходов, связанных с подачей воды для станций, в зависимости от ( $\delta t$ ) выразится

$$R = R_{цв} + R_k^k + R_k^{вод} + R_k^{нас} \quad (12)$$

Для определения разницы температур  $\delta t = t_2 - t_1$ , при которой годовые денежные расходы будут минимальными, берем первую производную  $\frac{dR}{d(\delta t)}$  и приравняем ее нулю. Обозначим

$$C_1 = \frac{860}{\eta_k \cdot Q_p^n} \left( 1 + \frac{\Sigma \Delta}{100} \right) \cdot \frac{R_t}{1000};$$

$$C_2 = \frac{\Delta i \cdot \rho_2 \cdot c_w \cdot \mathcal{E} \cdot d_3}{3600 \cdot 102 \cdot 2g \cdot \eta_n \cdot k};$$

$$C_3 = \frac{1,08 \cdot H_1 \cdot \Delta i \cdot d_3 \cdot \mathcal{E}}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_n};$$

$$C_4 = \frac{1,08 \cdot 3,5 \cdot A^{0,5} \cdot L_3 \cdot c_{вод}^{2,5} (\Delta i \cdot d_3 \cdot \mathcal{E})^{0,5}}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_n};$$

$$C_5 = \frac{\Delta i \cdot \mathcal{E} \cdot u \cdot d_3 (S_k)}{100 \cdot A \cdot k \left( \frac{S_k}{F} \right)};$$

$$C_6 = \frac{u \cdot L_0}{100} \cdot a;$$

$$C_7 = \frac{u \cdot L_0}{100} \cdot b' \cdot \sqrt{\frac{\Delta i \cdot d_3 \cdot \mathcal{E}}{c_{\text{вод}} \cdot A}};$$

$$C_8 = \frac{1,36 \cdot u \cdot f}{100} \cdot \frac{c_2}{A};$$

$$C_9 = \frac{1,36 \cdot u \cdot f}{100} \cdot \frac{C_3}{A}; C_{10} = \frac{1,36 \cdot u \cdot f}{100} \cdot \frac{C_4}{A}.$$

Введя эти обозначения, получаем из (12)

$$R = C_6 + \frac{1}{(\delta t)^{0,5}} \left[ C_7 + C_{10} + C_1 \cdot C_4 \right] + \\ + \frac{1}{\delta t} \left[ C_9 + C_1 \cdot C_3 \right] + \left[ C_1 \cdot C_2 + C_5 + C_8 \right] \cdot \frac{1}{\delta t} \cdot \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t}. \quad (13)$$

Обозначим далее

$$E_1 = C_7 + C_{10} + C_1 \cdot C_4;$$

$$E_2 = C_9 + C_1 \cdot C_3;$$

$$E_3 = C_1 \cdot C_2 + C_5 + C_8.$$

Тогда

$$R = C_6 + E_1 \frac{1}{(\delta t)^{0,5}} + E_2 \cdot \frac{1}{\delta t} + E_3 \cdot \frac{1}{\delta t} \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 - \delta t}. \quad (14)$$

Производя дифференцирование и приравнявая первую производную нулю, получим

$$-\frac{1}{\delta t} \ln \left( 1 - \frac{\delta t}{\Delta t_1} \right) = \frac{1}{\Delta t_1 - \delta t} - \frac{0,5 \cdot E_1}{E_3 (\delta t)^{0,5}} - \frac{E_2}{E_3 (\delta t)}. \quad (15)$$

Чтобы избавиться от  $\ln \left( 1 - \frac{\delta t}{\Delta t_1} \right)$ , произведем разложение в строку

$$-\frac{1}{\delta t} \ln \left( 1 - \frac{\delta t}{\Delta t_1} \right) = \frac{1}{\Delta t_1} + 0,5 \frac{\delta t}{(\Delta t_1)^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{(\delta t)^2}{(\Delta t_1)^3} + \dots$$

Можно остановиться на втором члене разложения, почему получаем

$$\frac{1}{\Delta t_1} + 0,5 \frac{\delta t}{(\Delta t_1)^2} = \frac{1}{\Delta t_1 - \delta t} - \frac{E_2}{E_3 (\delta t)} - \frac{0,5 \cdot E_1}{E_3 (\delta t)^{0,5}}. \quad (16)$$

Имея в виду, что  $(\delta t)^{0,5} = 1 + 0,5 \ln(\delta t) + 0,5 \cdot 0,25 [\ln(\delta t)]^2$  и что  $(\delta t)$  колеблется чаще всего в пределах  $5^\circ - 12^\circ \text{C}$ , найдем, что можно принять приближенно  $(\delta t)^{0,5} \cong 3$ . Тогда после приведения к одному знаменателю (16) и подбора подобных членов получим

$$(\delta t)^3 = -\Delta t_1 \left[ 1 + 0,33 \cdot \frac{E_1}{E_3} (\Delta t_1) \right] (\delta t)^2 -$$

$$-(\Delta t_1)^2 \left[ \frac{2E_2}{E_3} - \frac{0,33 \cdot E_1}{E_3} (\Delta t_1) \right] \delta t + \frac{2E_2}{E_3} (\Delta t_1)^3, \quad (17)$$

или

$$(\delta t)^3 = M_1 - M_2(\delta t) - M_3(\delta t)^2. \quad (18)$$

Уравнение (18) удобно решать графически. Обозначим  $y_1 = (\delta t)^3$  и  $y_2 = M_1 - M_2(\delta t) - M_3(\delta t)^2$ . Кривая  $y_1 = (\delta t)^3$  не зависит ни от каких местных условий и может быть построена раз навсегда. Что же касается кривой второго порядка  $y_2 = M_1 - M_2(\delta t) - M_3(\delta t)^2$ , то она является параболой, ординаты которой убывают вместе с увеличением  $(\delta t)$  и положение которой на чертеже зависит от значения коэффициентов  $M_1$ , и  $M_2$  и  $M_3$ . Величины этих коэффициентов обусловлены частными конкретными условиями. Пересечение кубической кривой  $y_1$  с параболой  $y_2$  определит точку, абсцисса которой и дает нам наивыгодную разность температур  $(\delta t)$ .

Уравнение (17) может быть представлено в таком виде:

$$\begin{aligned} (\delta t)^3 = & -\Delta t_1 (\delta t)^2 + \frac{2E_2}{E_3} \left[ (\Delta t_1)^3 - (\Delta t_1)^2 \delta t \right] + \\ & + \frac{0,33 \cdot E_1}{E_3} \left[ (\Delta t_1)^3 \delta t - (\Delta t_1)^2 (\delta t)^2 \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Величины  $[(\Delta t_1)^3 - (\Delta t_1)^2 \delta t]$  и  $[(\Delta t_1)^3 \delta t - (\Delta t_1)^2 (\delta t)^2]$  всегда положительны, почему ординаты параболы  $y_2$  увеличиваются вместе с  $\frac{2E_2}{E_3}$  и  $\frac{0,33 \cdot E_1}{E_3}$ ,

причем будет возрастать и  $(\delta t)$ . Это возрастание существенно зависит, как видим, от отношений  $\frac{E_2}{E_3}$  и  $\frac{E_1}{E_3}$ . Имеем для

$$\begin{aligned} \frac{E_2}{E_3} = & \frac{21 \cdot H_1 \cdot k}{\rho_2 \cdot c_w^3} \cdot \frac{86 \cdot \frac{A}{u} \left( 1 + \frac{\Sigma \Delta}{100} \right) R_t + 1,36 \cdot f \cdot \eta_k \cdot Q_p^n}{86 \cdot \frac{A}{u} \left( 1 + \frac{\Sigma \Delta}{100} \right) \cdot R_t + \left[ 7 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{S_k}{F} \right) \cdot \frac{\eta_k}{\rho_2 \cdot c_w^3} + 1,36 \cdot f \right] \cdot \eta_k \cdot Q_p^n} = \\ & 1 + \frac{1,36 \cdot f \cdot \eta_k \cdot Q_p^n \cdot \frac{u}{A}}{86 \left( 1 + \frac{\Sigma \Delta}{100} \right) R_t}, \quad (20) \\ = & \frac{21 \cdot H_1 \cdot k}{\rho_2 \cdot c_w^3} \cdot \frac{1,36 \cdot f \cdot \eta_k \cdot Q_p^n \cdot \frac{u}{A} + 7 \cdot 10^6 \left( \frac{S_k}{F} \right) \cdot \eta_k \cdot \eta_k \cdot Q_p^n \cdot \frac{u}{A}}{1 + \frac{1,36 \cdot f \cdot \eta_k \cdot Q_p^n \cdot \frac{u}{A}}{86 \left( 1 + \frac{\Sigma \Delta}{100} \right) R_t} + \frac{7 \cdot 10^6 \left( \frac{S_k}{F} \right) \cdot \eta_k \cdot \eta_k \cdot Q_p^n \cdot \frac{u}{A}}{\rho_2 \cdot c_w^3 \cdot 86 \left( 1 + \frac{\Sigma \Delta}{100} \right) \cdot R_t}}, \end{aligned}$$

что можно представить в виде

$$\frac{E_2}{E_3} = \frac{Z_1}{Z_2 + Z_3}. \quad (20a)$$

Значения  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_3$  можно определить по номограмме на рис. 3, построенной студентом-теплотехником Томского политехнического института Е. Н. Шадриним, теперь уже инженером, причем принято  $\eta_k = 0,68$ .

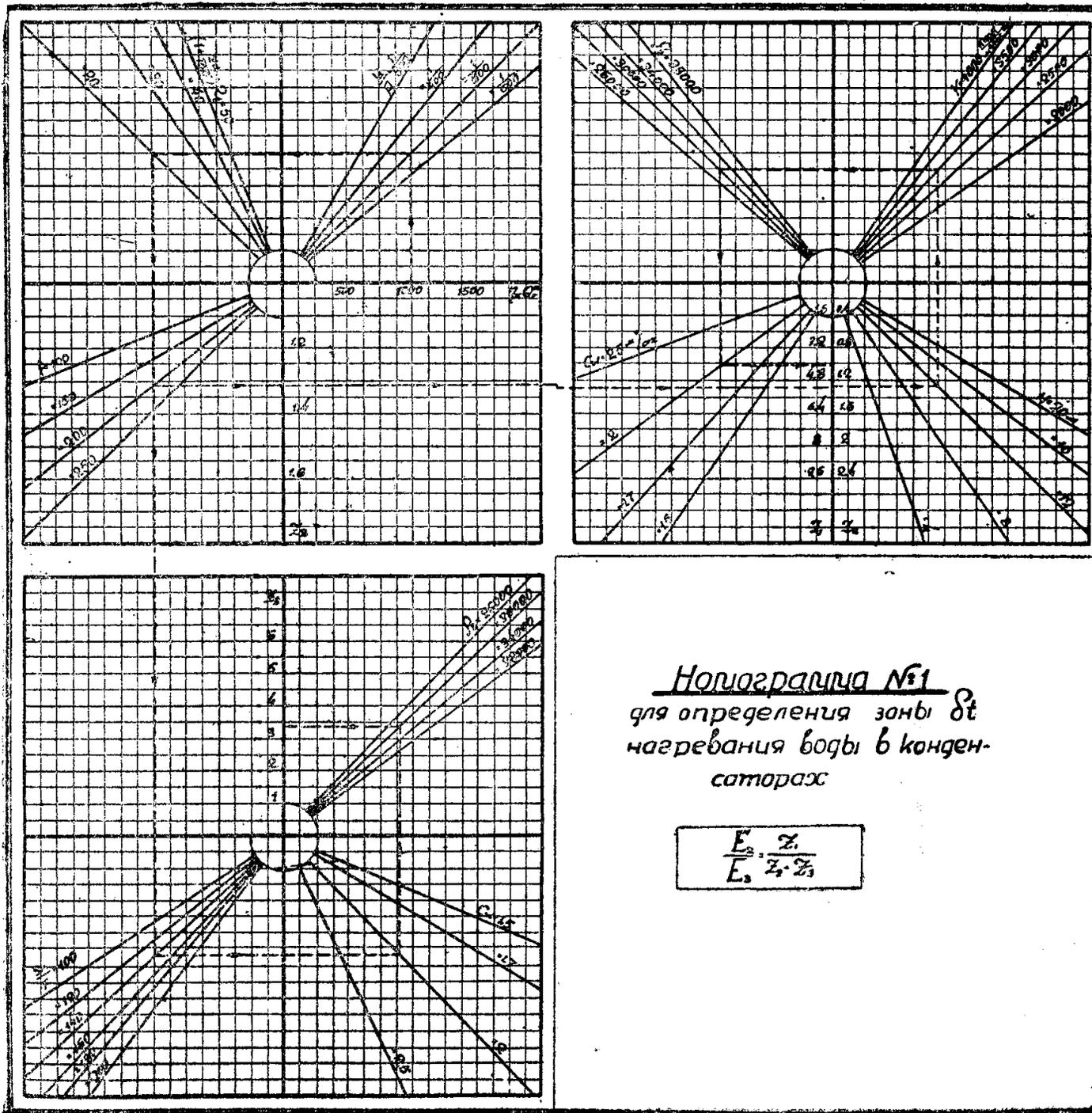


Рис. 3

И далее имеем для

$$\frac{E_1}{E_3} = \frac{k \cdot L_0}{(\Delta i \cdot d_3 \cdot N_3)^{0,5}} \cdot \frac{3,7 \cdot \alpha \cdot c_{\text{вод}}^{2,5} + \frac{\eta_n \cdot b' \cdot \frac{36,8}{c_{\text{вод}}^{2,5}}}{\eta_k \cdot Q_p^n \left(1 + \frac{\Sigma \Delta}{100}\right) R_t \cdot \frac{A}{u} + 1,36 \cdot f}}{0,051 \cdot \rho_2 \cdot c_w^3 + \frac{36,8 \cdot \eta_n (\Sigma c/F)}{\eta_k \cdot Q_p^n \left(1 + \frac{\Sigma \Delta}{100}\right) R_t \cdot \frac{A}{u} + 1,36 \cdot f}} \quad (21)$$

что можно представить в таком виде при  $\eta_n = 0,68$

$$\frac{E_1}{E_3} = \frac{k \cdot L_0}{(\Delta i \cdot d_3 \cdot N_3)^{0,5}} \cdot \frac{72,5 \cdot \alpha \cdot c_{\text{вод}}^{2,5}}{\rho_2 \cdot c_w^3} \cdot \frac{\left[ Z_2 + \frac{25 \cdot 10^4 \cdot b' \cdot \eta_k \cdot Q_p^n \cdot u/A}{3,7 \cdot \alpha \cdot c_{\text{вод}}^3 \left(1 + \frac{\Sigma \Delta}{100}\right) R_t} \right]}{Z_2 + Z_3} \quad (22)$$

или, приняв  $Z_4 = \frac{6,76 \cdot 10^4 \cdot b' \cdot \eta_k \cdot Q_p^n \cdot u/A}{\alpha \cdot c_{\text{вод}}^3 \left(1 + \frac{\Sigma \Delta}{100}\right) R_t}$ , имеем

$$\frac{E_1}{E_3} = Z_5 \cdot \frac{Z_2 + Z_4}{Z_2 + Z_3}, \quad \text{причем} \quad Z_5 = \frac{k \cdot L_0}{(\Delta i \cdot d_3 \cdot N_3)^{0,5}} \cdot \frac{72,5 \cdot \alpha \cdot c_{\text{вод}}^{2,5}}{\rho_2 \cdot c_w^3}$$

Для определения значений  $Z_4$  и  $Z_5$  можно воспользоваться номограммами на рис. 4 и 5, построенными тоже Е. Н. Шадриним.

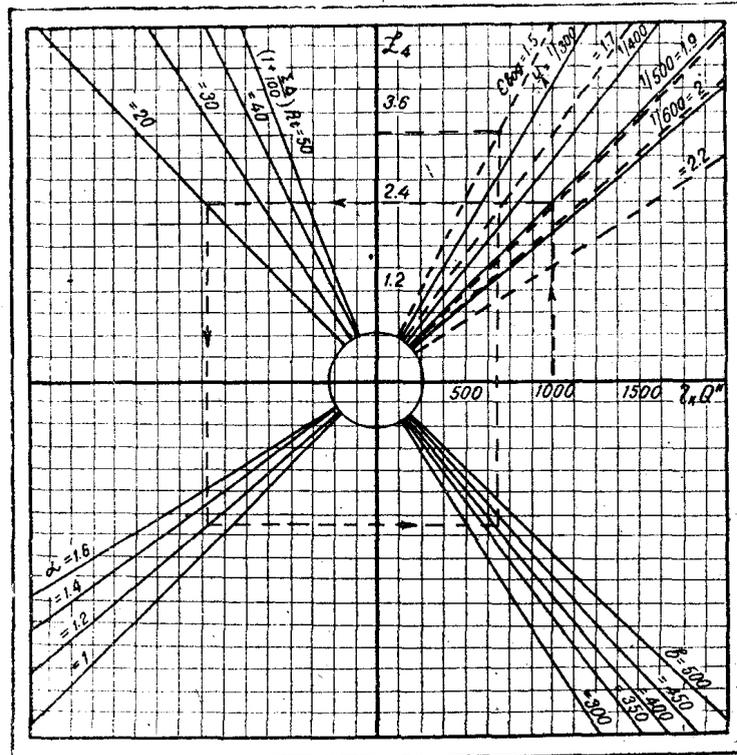


Рис. 4

Из выражений (20) и (21) видно, что перепад температур ( $\delta t$ ) в конденсаторе будет уменьшаться вместе с уменьшением нивелирной высоты.

$H_1$ , длины водовода  $L_0$ , с возрастанием мощности станции  $N_3$ . Эти именно обстоятельства дают основания в США выбирать большие кратности охлаждения ( $m=100-120$ ) при малых значениях ( $\delta t$ ) и одноходовых конденсаторах, так как многие американские станции, при крупных мощно-

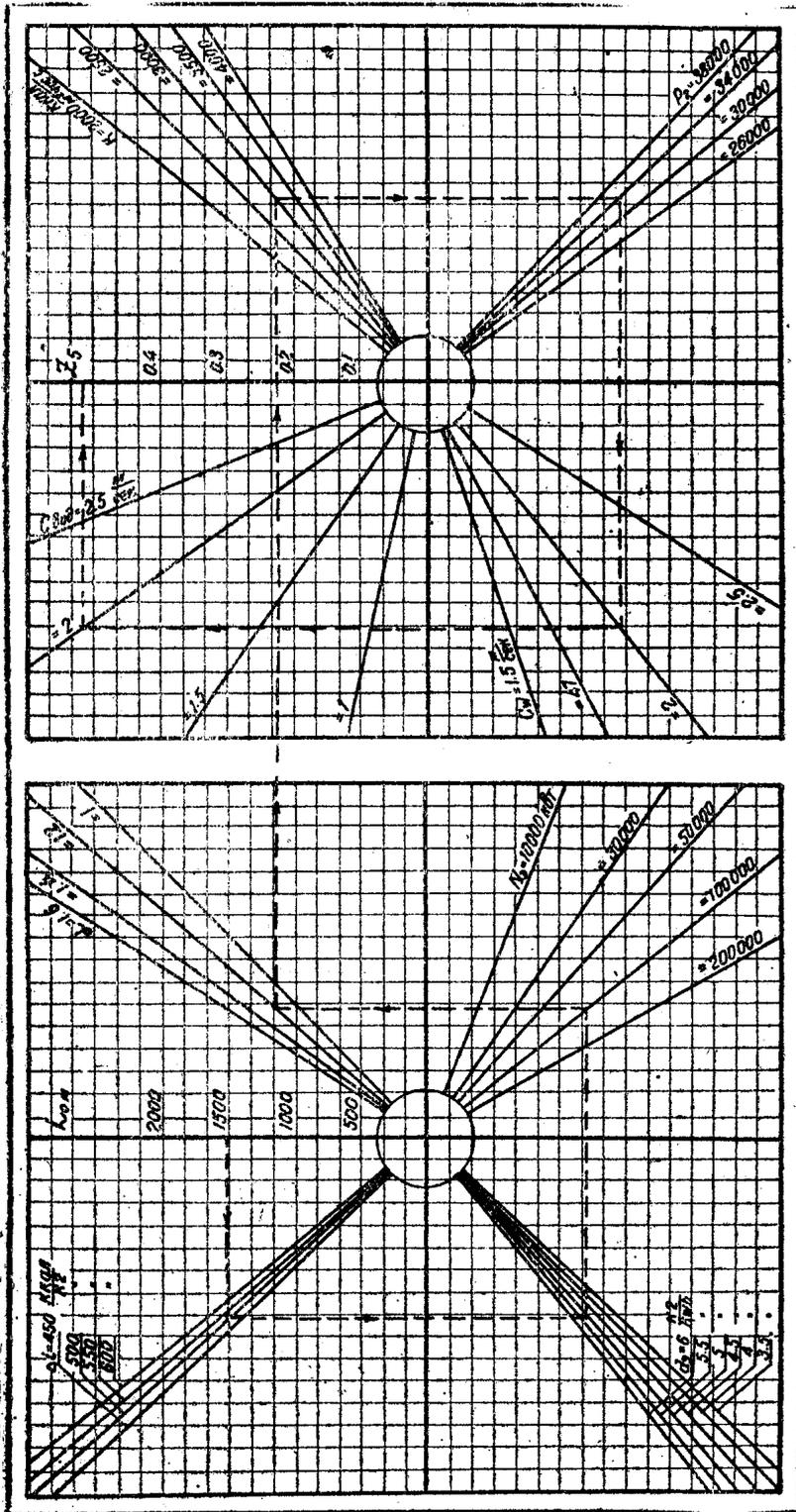


Рис. 5

стях, построены непосредственно на берегу мощных источников водоснабжения, имеют малые значения  $H_1$  и  $L_0$ .

Режим рек СССР характеризуется сильными колебаниями уровней воды в зависимости от времени года и в разные годы вследствие неравно-

мерности осадков по годам. Поэтому приходится, во избежание затопления, электростанции сооружать на крутых берегах, в значительном отдалении от рек, когда  $H_1$  и  $L_0$  получают большие по сравнению с США значения, вследствие чего нам и не приходится ориентироваться на малые перепады ( $\delta t$ ). Кроме того энергетическая политика направлена в СССР в сторону ТЭЦ с их сокращенными мощностями конденсационных частей, а также на строительство станций малой и средней мощностей, что должно влиять также в сторону повышения ( $\delta t$ ). Далее из выражения (20) следует, что при повышении  $Q_p^k$ ,  $R_t$ ,  $\eta_k$  и  $\frac{A}{u}$  будет уменьшаться

$E_2/E_3$ , а значит будет уменьшаться и ( $\delta t$ ). В США электростанции в большинстве случаев работают на высококалорийном топливе.

Статистические данные показывают, что на американских станциях, многие из которых, как и советские, стоят на современном уровне эксплуатации и работают с высокими начальными параметрами пара, число часов использования значительно меньше, чем в СССР. Отчисления по основным фондам  $u$  в США больше, так как сюда же входит процент на капитал, чего у нас нет. Все указанные обстоятельства, имеющие место в США, должны были побуждать американцев к применению больших кратностей охлаждения в конденсаторах. В СССР ориентация на применение низкосортных топлив, большое число часов использования при небольшом сравнительно проценте отчислений создают условия для применения больших перепадов ( $\delta t$ ) в конденсаторе.

Уравнение (17) упомянутой выше параболы можно представить в таком виде

$$y_2 = (\Delta t_1)^2 \left\{ \frac{2E_2}{E_3} [(\Delta t_1) - (\delta t)] + \frac{0,33 \cdot E_1}{E_3} [(\Delta t_1)(\delta t) - (\delta t)^2] - \frac{(\delta t)^2}{\Delta t_1} \right\}. \quad (23)$$

Чем больше  $\Delta t_1 = t_s - t_1$ , тем больше ординаты  $y_2$ , тем больше  $\delta t$ . При заданном вакууме, а значит и заданной температуре  $t_s$ , увеличение  $t_1$  уменьшает ординаты  $y_2$ , уменьшает перепад ( $\delta t$ ). Средняя годовая температура  $t_1$  в США выше, чем в СССР, почему разность  $t_s - t_1 = \Delta t_1$  больше в СССР и, следовательно, разность ( $\delta t$ ) у нас должна быть тоже больше.

Пользуясь вышеизложенным методом, определим наивыгодную разность температур  $\delta t = t_2 - t_1$ , для меняющихся вакуумов, приняв за исходные данные частного примера следующие:  $k = 3000$  кал/кв.м. °С час;  $H_1 = 10$  м;  $L_0 = 1100$  м;  $A = 5000$  час/год;  $\eta_k = 0,68$ ;  $u = 10\%$ ;  $S_k/F = 120$  руб/кв.м;  $Q_p^k = 5000$  кал/кг;  $R_t = 30$  руб/т;  $\Sigma \Delta = 20\%$ ;  $p_1 = 29$  атм;  $t_{пер} = 400^\circ\text{C}$ ;  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ ;  $c_w = 2$  м/сек;  $c_{вод} = 1,5$  м/сек;  $\mathcal{E} = 250 \cdot 10^6$  квтч;  $d_1 = 19$  мм;  $L = 6,0$  м;  $\beta = 1$ ;  $f = 200$  руб/л.с.;  $a = 25$ ;  $b = 400$ .

В нижеследующем приводятся результаты вычислений, произведенных студентом теплотехником Томского политехнического института (теперь уже инженером) тов. Кудояровым, являющимся деятельным участником этой нашей работы

$$\rho_2 = 9 \cdot 10^5 \left( 0,031 + \frac{1,4 \cdot 0,19}{6} \right) = 31820 ;$$

$$C_1 = \frac{860 \cdot 1,2 \cdot 30}{\eta_k \cdot 5000 \cdot 1000} = \frac{0,00619}{\eta_k} ;$$

$$C_2 = \frac{31820 \cdot 8 \cdot 250 \cdot 10^6 \cdot \Delta i \cdot d_3}{3600 \cdot 102 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,68 \cdot 3000} = 4330 \cdot \Delta i \cdot d_3 ;$$

$$C_3 = \frac{1,08 \cdot 10 \cdot 250 \cdot 10^6 \cdot \Delta i \cdot d_3}{3600 \cdot 102 \cdot 0,68} = 10800 \cdot \Delta i \cdot d_3 ;$$

$$C_4 = \frac{1,08 \cdot 3,5 \cdot 15800 \cdot 1100 \cdot 70,6 \cdot 2,76 \sqrt{\Delta i \cdot d_3}}{3600 \cdot 102 \cdot 0,68} = 51200 \sqrt{\Delta i \cdot d_3};$$

$$C_5 = \frac{250 \cdot 10^6 \cdot 120 \cdot \Delta i \cdot d_3}{100 \cdot 5000 \cdot 3000} = 200 \cdot \Delta i \cdot d_3;$$

$$C_6 = \frac{10 \cdot 1000 \cdot 25}{100} = 2500;$$

$$C_7 = \frac{10 \cdot 1000 \cdot 400}{100} \sqrt{\frac{250 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 1,08 \cdot \Delta i \cdot d_3}{3600 \cdot 2 \cdot 1000 \cdot 5000 \cdot \pi \cdot 1,5}} = 3020 \sqrt{\Delta i \cdot d_3};$$

$$C_8 = \frac{1,36 \cdot 10 \cdot 200 \cdot 4330 \cdot \Delta i \cdot d_3}{100 \cdot 5000} = 23,6 \cdot \Delta i \cdot d_3;$$

$$C_9 = \frac{1,36 \cdot 10 \cdot 200 \cdot 10800 \cdot \Delta i \cdot d_3}{100 \cdot 5000} = 58,8 \cdot \Delta i \cdot d_3;$$

$$C_{10} = \frac{1,36 \cdot 10 \cdot 200 \cdot 51200 \cdot \sqrt{\Delta i \cdot d_3}}{100 \cdot 5000} = 278,5 \sqrt{\Delta i \cdot d_3};$$

$$E_1 = (3298,5 + 317/\eta_k) \sqrt{\Delta i \cdot d_3};$$

$$E_2 = (58,8 + 67/\eta_k) \Delta i \cdot d_3;$$

$$E_3 = (223,6 + 27/\eta_k) \Delta i \cdot d_3.$$

Произведение  $\Delta i \cdot d_3$  меняется вместе с изменением вакуума. Приняв  $\eta_{ку} = 0,85$ ;  $\eta_{ном} = 0,94$ ;  $\eta_{oi} = 0,83$  для условий нормального вакуума  $p_2 = 0,04 \text{ атм}$ , а также изменение  $\eta_{oi}$  0,3% при изменении влажности на 1%;  $\eta_{ген} = 0,96$ ;  $\eta_{мех} = 0,995$ ;  $t_s = t_k - 1$ , получим округленно:

$p_2 = 0,02$	0,03	0,04	0,05	0,08
$\eta_k = 0,238$	0,23	0,224	0,22	0,21
$c_1 = 0,0260$	0,0269	0,0276	0,0281	0,0294
$\Delta i = 515,8$	517,2	518	518,5	519,8
$d_3 = 3,74$	3,86	3,96	4,04	4,22
$E_1 = 202500$	209000	210300	210700	224100
$E_2 = 655000$	698000	732000	762000	825000
$E_3 = 650000$	680000	704000	725000	770000
$\Delta t_1 = 6,2$	12,8	16,6	21,5	30,2
$M_3 = 10,15$	29,4	43,7	66	118
$M_2 = 53,2$	123	123	14	-695
$M_1 = 485$	4315	9570	21000	59000
$\delta t = 4,25^\circ\text{C}$	$9,1^\circ\text{C}$	$12,05^\circ\text{C}$	$15,9^\circ\text{C}$	$23^\circ\text{C}$

Уравнение  $(\delta t)^3 = M_1 - M_2(\delta t) - M_3(\delta t)^2$  может быть представлено в таком виде

$$(\delta t)^2(\delta t + M_3) = M_1 - M_2(\delta t),$$

$$\text{Откуда } \delta t = \frac{M_1/\delta t - M_2}{\delta t + M_3},$$

так что  $\delta t$  может быть довольно просто определено также и подбором из последнего равенства при заданных  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$ . В результате подбора

и определены оптимальные значения ( $\delta t$ ) для разных вакуумов, значущиеся в конце вышеприведенной таблицы: на рис. 6 дана графическая зависимость ( $\delta t$ ) от вакуума для разобранный выше частного примера.

На рис. 6 показаны изменения ( $\delta t$ ) для случая, когда нивелирная высота  $H_1$  и эквивалентное расстояние  $L_3$  станции от источника водоснабжения увеличились вдвое, достигнув величин, при которых применение прямого водоснабжения становится уже нерентабельным. С другой стороны, на рис. 6 показан случай, когда  $H_1$  уменьшена вдвое, а  $L_3 = 100$  м.

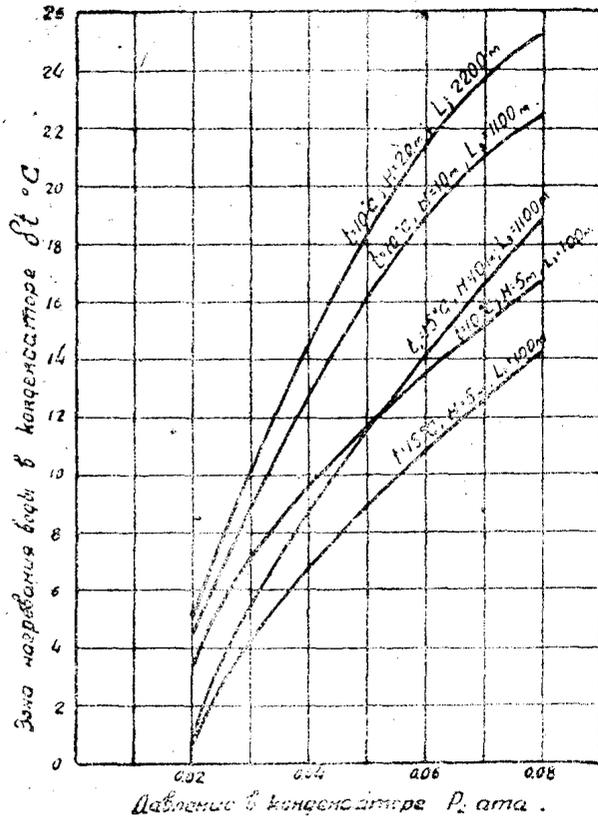


Рис. 6

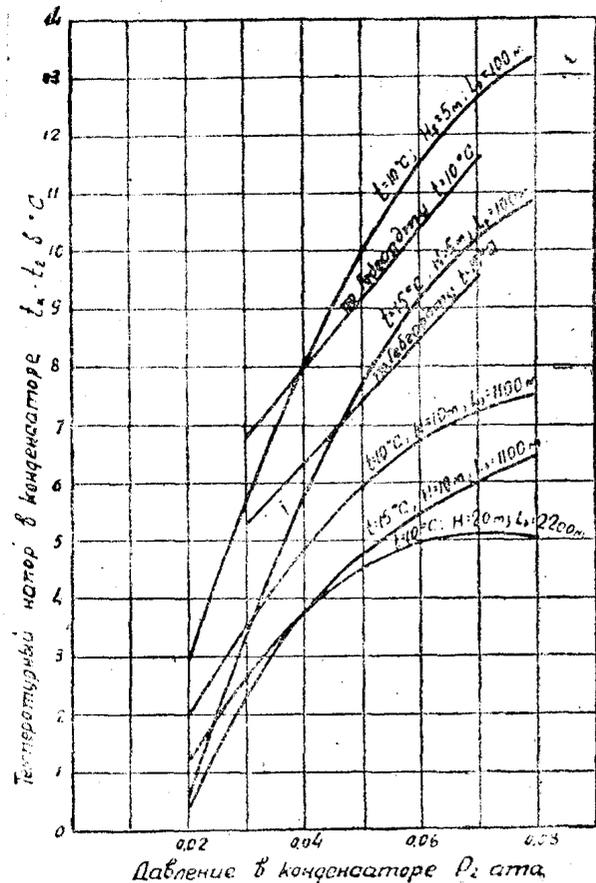


Рис. 7

Из графика видно, что разница значений ( $\delta t$ ) для этих двух случаев при  $p_2 = 0,03$  атм будет  $\sim 2,5^\circ\text{C}$ , а при  $p_2 = 0,04$  атм даже  $\sim 3,5^\circ\text{C}$ .

Рис. 7 устанавливает интересное положение: при малых нивелирных высотах  $H_1$  и коротких расстояниях  $L_3$  разности  $(t_k - t_2) = t_k - (\delta t) - t_1$ , полученные в результате проведенного исследования и по Гебгардту, оказываются близко совпадающими, что имеет место и при глубоких вакуумах порядка 0,03—0,04 атм как при температуре циркуляционной воды на входе  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , так и  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ . Другое дело при возрастании нивелирной высоты ( $H_1 > 5$  м) и расстояния  $L_3$ , разности  $(t_k - t_2)$  становятся недостаточными, по сравнению с установленными опытом нормами (по Гебгардту) и в частности в области глубоких вакуумов. Нижняя кривая рис. 7 ярко показывает нецелесообразность прямого водоснабжения при  $H_1 = 20$  м и  $L_3 = 2200$  м, несмотря на температуру воды  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ ; разности  $(t_k - t_2)$  становятся в этом случае в совершенно резкое противоречие с данными опыта и явно неприемлемы, как весьма малые.

Из всего сказанного напрашивается ряд выводов:

1. Получение глубоких вакуумов в условиях СССР является во многих случаях затруднительным вследствие особенностей наших рек. Широкое

применение ТЭЦ значительно сокращает на них конденсационную мощность, что, как мы видели, влияет отрицательно на возможности применения более глубоких вакуумов. В том же направлении действуют и решения XVIII съезда партии относительно строительства ТЭС средней и малой мощности.

2. Применение низкосортных топлив, более высокие значения  $A/u$ , что имеет место в СССР, влияют в сторону повышения  $(\delta t)$  и применения менее глубоких вакуумов на наших электростанциях.

3. Исследование установило сильную зависимость  $(\delta t)$  от  $(\Delta t_1)$ , так что переход с  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  на  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  при небольших нивелирных высотах  $H_1$  и расстояниях  $L_2$  не дает серьезного эффекта в отношении углубления вакуума, если принять во внимание, что  $(t_k - t_2)$  при этом увеличивается.

4. Использование дара нашей суровой природы—низких температур циркуляционной воды зимою ( $1-2^\circ\text{C}$ ) целесообразно реализовать путем устройства утилизационных установок по типу Клода и Бушера, как описано в статье автора „Использование тепла циркуляционной воды на электростанциях для производства электроэнергии [4]“.

5. Помимо преимуществ такой утилизационной установки, указанных в вышеупомянутой статье, можно отметить еще одну возможность экономии топлива, а именно за счет углубления вакуума главных турбин при  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ . Утилизационная установка в ряде случаев может быть размещена в небольшом сравнительно расстоянии от главных турбин при значительном иногда уменьшении нивелирной высоты, вследствие чего целесообразным станет у главных турбин применение одноходовых конденсаторов с небольшой разностью температур воды на выходе и входе. В этом случае при вакууме  $p_2 = 0,035 \text{ ата}$  можно иметь температуру пара в конденсаторе около  $27^\circ\text{C}$ . Циркуляционная же вода на выходе из конденсатора получит температуру  $t_2 = 21 - 22^\circ\text{C}$ . Кратность охлаждения окажется около 90, что дает увеличение количества циркуляционной воды в 1,5 раза против случая, разобранный в указанной выше статье. Перепад же температур в испарителе уменьшится с  $10^\circ\text{C}$  до  $7^\circ\text{C}$ , т. е. в 1,43 раза, так что количество получаемого в испарителе пара и мощность утилизационной установки останутся почти без изменения. В главных же турбинах мощность возрастает вследствие углубления вакуума. При этом придется столкнуться с возможной необходимостью отказаться от однокорпусных турбин в части низкого давления, что неизбежно удорожит и усложнит турбогенераторы.

6. Решения Технического совета НКЭС в части, касающейся перехода к глубокому вакууму при кратности охлаждения 50–60, при температуре при входе в конденсатор  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , надо считать нуждающимися в пересмотре. Рекомендованное Техническим советом МЭС (Электрические станции, 1945, № 4–5) уменьшение нивелирной высоты понижением уровня пола конденсационного помещения едва ли целесообразно, так как, помимо трудности в ряде случаев оправдать это экономически, тут будет иметь место лишение этого помещения естественного света, может в подвал попадать вода во время ливней, таяния снега, во время половодья, при наличии рекомендуемого приближения главного здания к водосточнику, возникнут затруднения с прокладкой ж.-д. путей внутри машинного зала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анатолиев Ф. А.—Расчет в вспомогательных устройствах паросиловых установок, ОНТИ, 1936, стр. 26, а также рис. 21.
2. Радциг А. А. Теория и расчет конденсационных установок, ГЭИ, 1934, стр. 107.
3. Буланин В. И.—К методике расчета поверхностных конденсаторов, Советское котлотурбостроение, № 2, 1938.
4. Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова, т. 63, 1944.