

Б. В. Яковлев

(Белорусский политехнический институт)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СМЕШИВАЮЩИХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ В РЕГЕНЕРАТИВНОЙ СХЕМЕ МОЩНЫХ ПАРОТУРБИННЫХ БЛОКОВ

Основным типом регенеративного подогревателя, применяемого в тепловых схемах станций, является поверхностный подогреватель, работающий с конденсацией греющего пара. Преимуществами его являются независимость давления греющего пара и воды, достаточная надежность и простота компоновки. Однако нагрев воды в поверхностных подогревателях возможен до температуры меньшей, чем температура конденсации греющего пара, что объясняется наличием термического сопротивления трубок подогревателя, которое в свою очередь зависит от многих конструктивных и эксплуатационных факторов. Наличие недогрева (разность между температурой насыщения в подогревателе и температурой воды на выходе из него) увеличивает давление отбираемого из турбины пара и, следовательно, уменьшает выработку электроэнергии в регенеративном цикле.

Стремление уменьшить недогрев приводит, с одной стороны, к экономии топлива, а с другой — к снижению интенсивности теплообмена, увеличению поверхностей нагрева и стоимости подогревателей. Оптимальная величина расчетного недогрева зависит от стоимости топлива, давления греющего пара, величины недогрева воды в подогревателе, а также стоимости материала подогревателя.

Так, уменьшение стоимости топлива влечет за собой увеличение расчетного недогрева в подогревателе (табл. 1).

Таблица 1

Элементы поверхности нагрева	Подогреватели			
	высокого давления		низкого давления	
	стоимость топлива, руб/т у.т.			
	15	3	15	3
Собственно подогреватель	3—3,5	5—6	1—1,5	2—2,5
Охладитель перегрева	6*	10	6*	6*
Охладитель конденсата	5—6	8—10	4—5	7—8

* Минимальная величина по условиям предотвращения конденсации пара.

Увеличение давления греющего пара при прочих равных условиях вызывает увеличение расчетного оптимального недогрева в подогревателе высокого давления. Увеличение недогрева воды приводит к уменьшению оптимального недогрева в подогревателе. И, наконец, чем больше стоимость материала трубок, тем большей оказывается величина недогрева.

Серьезным недостатком поверхностных подогревателей является также необходимость отвода из них конденсата греющего пара, что усложняет тепловую схему и снижает ее экономичность.

При работе турбоустановки на переменных режимах недогрев в поверхностных регенеративных подогревателях значительно отклоняется от расчетного и изменяется по экспоненциальному закону:

$$\delta t_{\text{п}} = \frac{t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}}{e^{\frac{kF}{Gc}} - 1} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где $\delta t_{\text{п}} = t_{\text{нас}} - t_{\text{вых}}$ — недогрев воды в подогревателе до температуры насыщения $t_{\text{нас}}$, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{вых}}$ — температура нагреваемой воды на входе и выходе из подогревателя, $^\circ\text{C}$; k — коэффициент теплопередачи, $\text{вт/м}^2\text{-град}$; F — поверхность нагрева подогревателя, м^2 ; G — расход воды через подогреватель, кг/сек ; c — удельная теплоемкость воды, дж/кг-град .

Величина $\delta t_{\text{п}}$ зависит не только от режимных параметров, входящих в уравнение (1), но и от условий эксплуатации: состояния поверхности нагрева, уровня конденсата в подогревателе, присутствия неконденсирующихся газов с паровой стороны, плотности вакуумной системы и пр.

Испытания регенеративной системы действующих турбоустановок показывают, что недогрев в подогревателях даже в расчетном режиме, как правило, оказывается значительно выше оптимального. Особенно это характерно для подогревателей низкого давления. Для иллюстрации на рис. 1 приведены данные по изменению давления пара, температуры нагреваемого конденсата и недогревов в подогревателях низкого давления ПНД-1 и ПНД-2 турбоустановки К-300-240 ЛМЗ, полученные на основании испытаний.

Как следует из рис. 1, недогрев в ПНД-1 и ПНД-2 в расчетном режиме (при номинальной мощности турбоустановки) соответственно равен 6 и 12°C , что свидетельствует о неудовлетворительном состоянии регенеративной системы турбоустановки и приводит к значительной невыработке электроэнергии. Заметное отклонение от расчетного недогрева имеет место и в других подогревателях низкого и высокого давлений.

Устранить недогрев в регенеративных подогревателях (уменьшить его до нуля) и связанные с ним недостатки можно при применении подогревателей смешивающего (контактного) типа. Отсутствие недогрева является главным преимуществом смешивающих подогревателей. Смешивающие регенеративные подогреватели в несколько раз уменьшают расход металла на поверхность нагрева и конструктивно выполняются из расчета подогрева и дегазации питательной воды.

Возможность дегазации воды является важным дополнительным достоинством смешивающих подогревателей, так как это предотвращает коррозию металла, что повышает надежность работы регенеративной системы и качества питательной воды. В смешивающих подогревателях отпадает необходимость отвода конденсата греющего пара.

Отмеченные достоинства смешивающих подогревателей существенно повышают тепловую экономичность регенеративного цикла. Однако смешивающие подогреватели имеют и серьезные недостатки. Так, давление воды в каждом последовательно расположенном смешивающем подогревателе должно быть равно давлению греющего пара, возрастающему в направлении движения воды. Это означает, что перед каждым подогревателем должен стоять уравнительный насос, перед которым необходимы соответствующий подпор и наличие водяной емкости в нижней части подогревателя.

При применении смешивающих подогревателей снижается надежность работы турбоустановки в условиях переменных режимов из-за возможного заброса в проточную часть питательной воды и кавитации перекачивающих насосов, работающих на горячей воде.

Для уменьшения числа перекачивающих насосов возможно такое включение смешивающих подогревателей, при котором конденсат из предыдущего подогревателя меньшего давления поступает в последующий подогреватель большего давления самотеком — за счет разности уровней их установки. Однако это оправдано лишь при разности давлений в двух

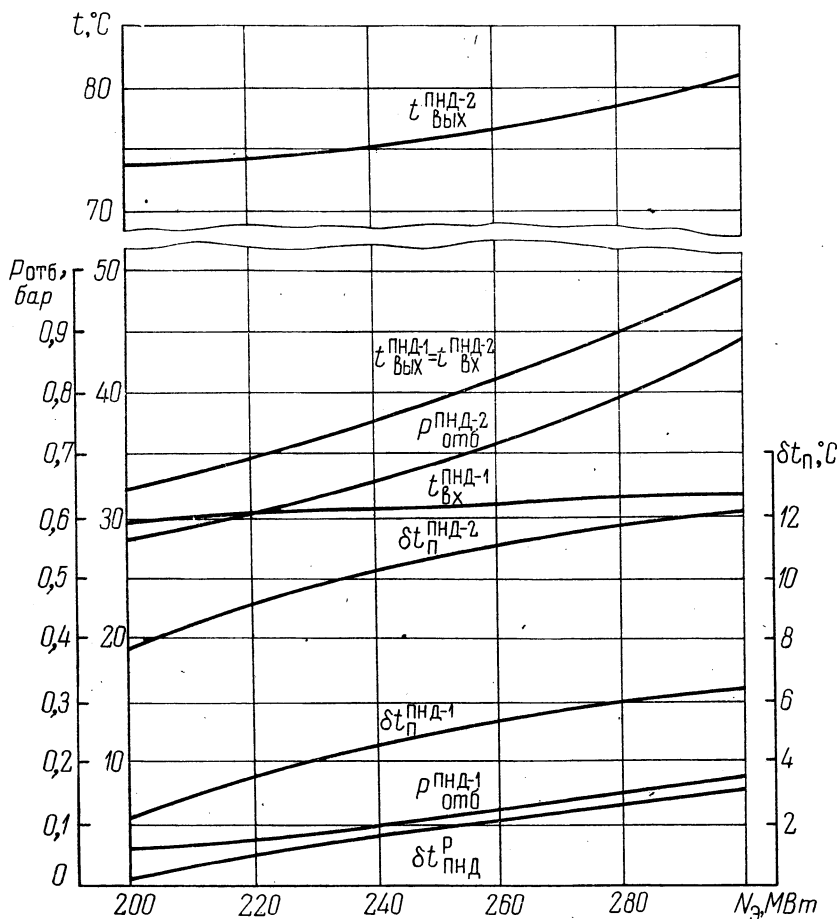


Рис. 1. Изменение давления пара в отборах ($p_{\text{отб}}$), температуры нагретого конденсата ($t_{\text{вх}}$, $t_{\text{вых}}$), недогрева ($\delta t_{\text{п}}$) в ПНД-1 и ПНД-2 турбоустановки К-300-240ЛМЗ:

$\delta t_{\text{п}}^{\text{р}}$ — расчетный недогрев.

последовательно расположенных подогревателях не более 1,2—1,4 бар, поскольку при этом усложняется компоновка из-за необходимости установки подогревателя меньшего давления на значительной высоте. Поэтому смешивающие подогреватели обычно применяются в качестве первых двух подогревателей низкого давления, в которых разность давлений составляет 0,6—0,8 бар.

Возможность и эффективность применения смешивающих регенеративных подогревателей низкого давления рассмотрим применительно к блоку К-300-240 ЛМЗ, исходная схема включения подогревателей низкого давления которого представлена на рис. 2.

При замене поверхностных подогревателей ПНД-1 и ПНД-2 смешивающими схема изменяется и приобретает вид, показанный на рис. 3. В

отличие от схемы рис. 2 охладитель дренажа устанавливается между ПНД-4 и ПНД-3, а дренажный (откачивающий) насос — у ПНД-3.

Смешивающий подогреватель ПНД-1С располагается на отметке +12,9 м, а ПНД-2С — на отметке +2,7 м так, чтобы разность между их осями составляла 10 м, что обеспечивает отвод конденсата из ПНД-1С в ПНД-2С самотеком. Подача конденсата в ПНД-1С осущест-

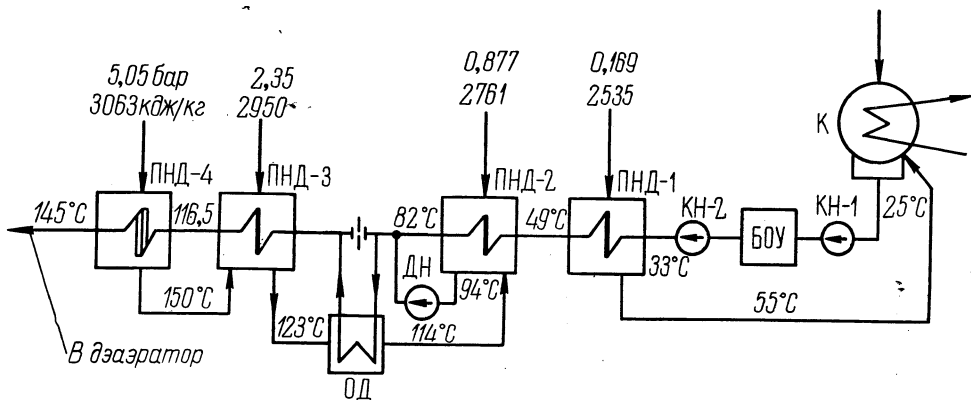


Рис. 2. Схема включения поверхностных регенеративных подогревателей низкого давления турбоустановки К-300-240ЛМЗ:

ПНД — поверхностный подогреватель низкого давления; ОД — охладитель дренажа; ДН — дренажный насос; КН — конденсатный насос; К — конденсатор; БОУ — блочная обессоливающая установка.

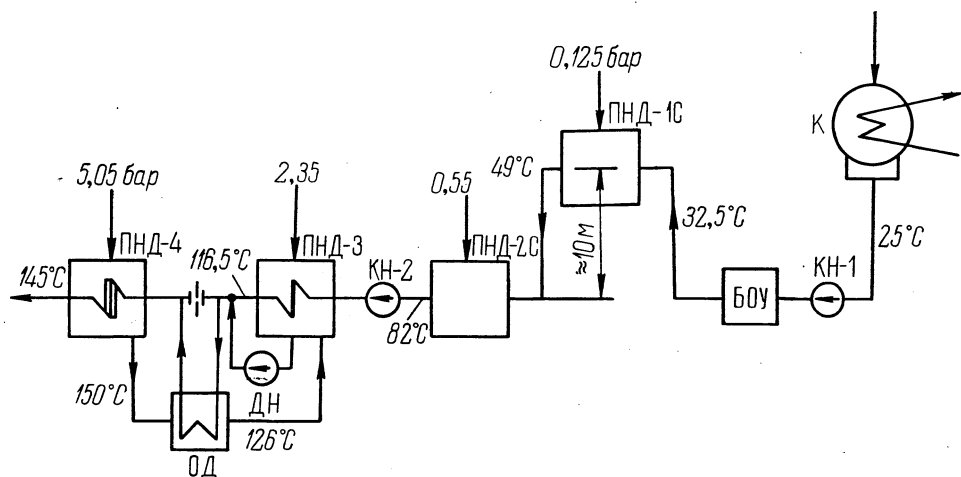


Рис. 3. Схема включения поверхностных и смешивающих регенеративных подогревателей низкого давления турбоустановки К-300-240ЛМЗ:

ПНД-1С, ПНД-2С — смешивающие подогреватели низкого давления; остальные обозначения те же, что на рис. 2.

вляется конденсатным насосом первой ступени (КН-1) блочной обессоливающей установки, а откачка его из ПНД-2С и подача в последующие поверхностные подогреватели производится конденсатным насосом второй ступени (КН-2). Для создания подпора КН-2 устанавливается на отметке —2,0 м.

Примерная компоновка горизонтальных смешивающих подогревателей приведена на рис. 4.

Смешивающие регенеративные подогреватели низкого давления уже применялись на отечественных блоках К-300-240. Однако из-за недоработки и несовершенства схемы их включения произошли аварии с тур-

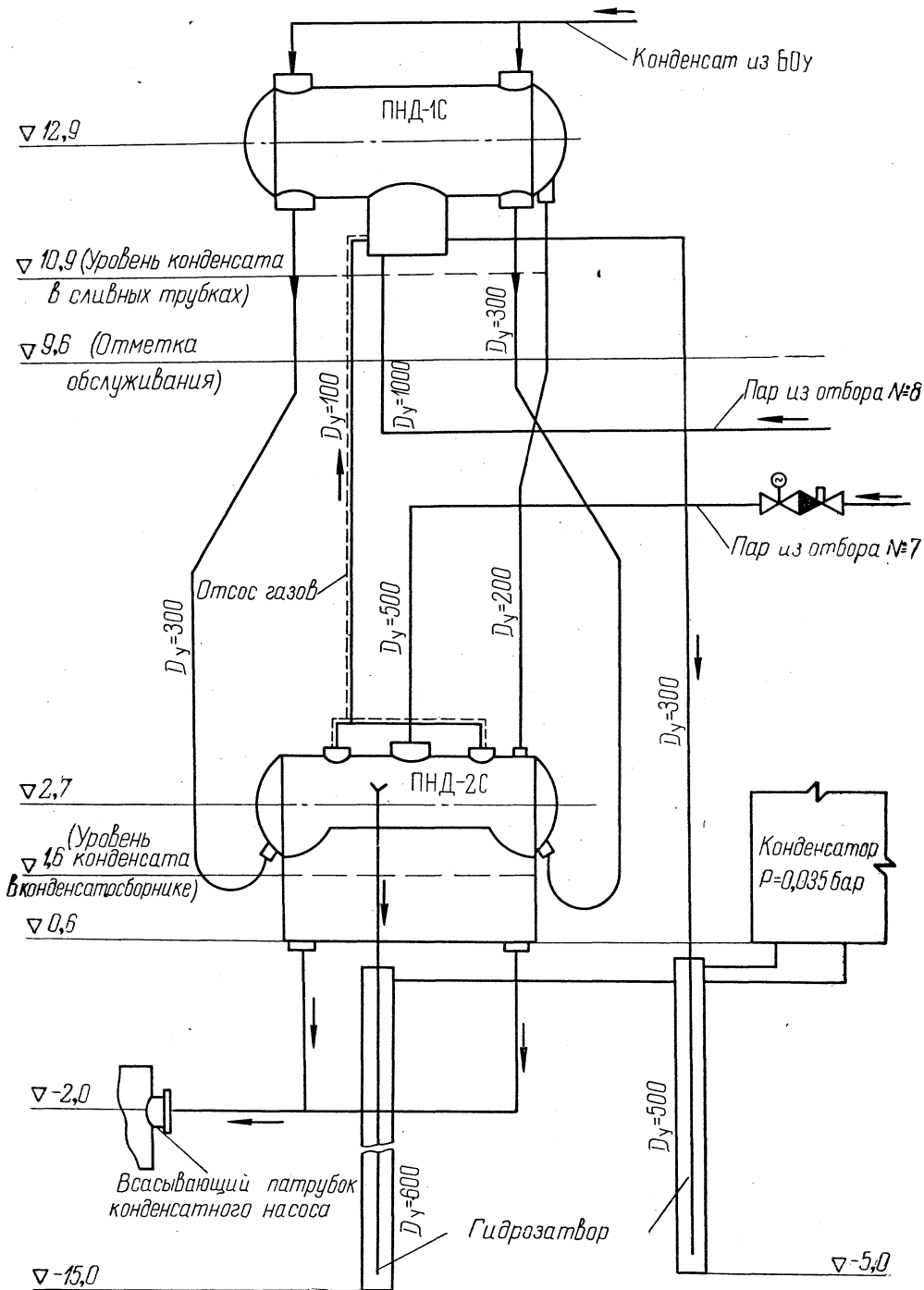


Рис. 4. Схема компоновки регенеративных подогревателей низкого давления турбоустановки К-300-240ЛМЗ.

бинами, что вызвало, на наш взгляд, необоснованный отказ от дальнейшего применения смешивающих подогревателей. Дело в том, что в применявшейся схеме, как и при поверхностных подогревателях, сохранялся каскадный слив дренажа из ПНД-4 в ПНД-3, а из ПНД-3 — в смешивающий ПНД-2С. В результате этого, а также ненадежно выполненной защиты от заброса воды в турбину смешивающий подогреватель ПНД-2С в одном из режимов попал под более высокое давление, и из него произошел заброс воды в проточную часть турбины, вызвавший разрушение лопаточного аппарата.

Более совершенная схема включения смешивающих подогревателей приведена на рис. 3. В этой схеме исключен каскадный слив дренажа в смешивающий подогреватель ПНД-2С, что не только повысило надежность, но и увеличило экономичность схемы. Далее, в ранее применявшейся схеме между поверхностным ПНД-3 и смешивающим ПНД-2С подогревателями сохранялся охладитель дренажа, через который осуществлялся слив конденсата более высокого потенциала из ПНД-3. Хотя охладитель и снижал температуру конденсата, однако все же энтальпия его была выше энтальпии конденсата в ПНД-2С, что вызывало вытеснение пара отбора ПНД-2С, а следовательно, и уменьшение регенеративной выработки электроэнергии. При устранении слива конденсата в ПНД-2С количество пара в этот отбор увеличивается. В схеме рис. 3 охладитель дренажа установлен между ПНД-4 и ПНД-3, благодаря чему энтальпия конденсата, идущего из ПНД-4 в ПНД-3, оказывается ниже, чем в старой схеме, что увеличивает расход пара в ПНД-3 и выработку электроэнергии на этом отборе.

При использовании смешивающих подогревателей вопрос надежности работы турбоустановки имеет первостепенное значение.

Регенеративные смешивающие подогреватели оснащаются автоматическими байпасными линиями, предохранительными и переливными устройствами в виде гидрозатворов, а для предотвращения заброса воды в турбину на линии отбора пара устанавливаются быстродействующие отсечные клапаны.

Отсутствие недогрева в смешивающем подогревателе дает возможность отбирать для подогрева воды до той же температуры, что и в поверхностном подогревателе, пар меньшего давления. Адиабатический теплоперепад отбираемого на подогреватель пара увеличивается при этом на величину

$$\Delta h = a \delta t_{\text{п}} \text{ кдж/кг},$$

где a — термодинамический коэффициент пропорциональности, $\text{кдж/кг}\cdot\text{град}$; $\delta t_{\text{п}}$ — величина недогрева в поверхностном подогревателе, $^{\circ}\text{C}$.

Прирост мощности за счет устранения недогрева

$$\Delta N_{\text{нед}} = \Delta h D_{\text{п}} \eta_{oi} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}} \text{ квт},$$

где $D_{\text{п}}$ — расход пара на подогреватель, кг/сек ; η_{oi} — внутренний относительный к.п.д. отсека турбины $\eta_{\text{м}}$, $\eta_{\text{г}}$ — соответственно механический к.п.д. турбины и к.п.д. электрического генератора.

Устранение или уменьшение вытеснения пара отбора низкого потенциала дренажем пара более высокого потенциала дает прирост мощности турбоустановки на величину

$$\Delta N_{\text{выт}} = \Delta D \Delta H \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}} \text{ квт},$$

где ΔD — дополнительное количество пара, отбираемого на данный подогреватель, кг/сек ; ΔH — срабатываемый в турбине теплоперепад на дополнительном потоке пара ΔD , кдж кг .

При исключении слива дренажа из ПНД-3 в ПНД-2С в схеме рис. 3 по сравнению со схемой рис. 2 величина ΔH представляет теплоперепад, срабатываемый между отборами пара на ПНД-4 и ПНД-2С, поскольку повышение температуры конденсата на входе в ПНД-4 за счет слива перед ним дренажа из ПНД-3 уменьшает на величину ΔD_4 расход пара на ПНД-4 и, напротив, на эту же величину увеличивает его расход на ПНД-2С.

Температура конденсата на выходе из ПНД-1С, ПНД-2С и ПНД-3 в схеме рис. 3 принимается неизменной, а повышение температуры конденсата в КН-2 порядка $0,5^\circ\text{C}$ вызывает уменьшение расхода пара на ПНД-3 и увеличение его на ПНД-1С при дополнительном перепаде между этими отборами.

Применение охладителя дренажа между ПНД-4 и ПНД-3 в схеме рис. 3 уменьшает расход пара на ПНД-4 и увеличивает его на ПНД-3 с дополнительно срабатываемым между этими отборами теплоперепадом ΔH .

Величина вытесняемого или дополнительно отбираемого количества пара определяется из выражения

$$\Delta D = \frac{\Delta Q_{\text{выт}}}{i_{\text{п}} - i'_{\text{п}}} = \frac{D_{\text{др}}(i_{\text{др}} - i'_{\text{п}})}{i_{\text{п}} - i'_{\text{п}}} \text{ кг/сек},$$

где $\Delta Q_{\text{выт}}$ — количество вытесняемого в данном подогревателе тепла, кдж/сек ; $D_{\text{др}}$, $i_{\text{др}}$ — соответственно количество сливаемого в данный подогреватель дренажа и его энтальпия, кг/сек , кдж/кг ; $i_{\text{п}}$, $i'_{\text{п}}$ — соответственно энтальпия отбираемого на данный подогреватель пара и его конденсата при температуре насыщения, кдж/кг .

Полный прирост мощности турбины за счет установки смешивающих подогревателей низкого давления и улучшения регенеративной схемы

$$\Delta N = \Delta N_{\text{нед}} + \Delta N_{\text{выт}} \text{ квт.}$$

Изменением мощности конденсатных насосов (КН-1 и КН-2) и дренажного насоса в схеме рис. 3 можно пренебречь вследствие весьма незначительного влияния этой составляющей на конечный результат. При этом суммарная мощность насосной группы в схеме рис. 3 оказывается меньше.

Годовая экономия топлива

$$\Delta B = \Delta N b_{\text{кэс}} h_{\text{кэс}}^{\text{уст}} \cdot 10^{-3} \text{ т/год},$$

где $b_{\text{кэс}}$ — удельный расход топлива на выработку электроэнергии, $\text{кг у.т./квт}\cdot\text{ч}$; $h_{\text{кэс}}^{\text{уст}}$ — число часов использования установленной мощности, ч/год .

Экономия расчетных затрат

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \Delta Z_{\text{кэс}}^{\text{зам}} - \Delta Z_{\text{рег}} + \Delta Z_{\text{т}} = \\ &= k_{\text{кэс}}^{\text{уд}} \Delta N (p_{\text{п}} + 1,2p_{\text{а}}) - \Delta K_{\text{рег}} (p_{\text{п}} + 1,2p_{\text{а}}) + z_{\text{т}}^{\text{уд}} \Delta B, \end{aligned}$$

где $\Delta Z_{\text{кэс}}^{\text{зам}}$, $\Delta Z_{\text{рег}}$, $\Delta Z_{\text{т}}$ — изменение расчетных затрат на замещающую мощность, регенеративную установку и топливо, руб/год ; $k_{\text{кэс}}^{\text{уд}}$ — удельные капиталовложения в замещающую КЭС, руб/квт ; $\Delta K_{\text{рег}}$ — изменение капитальных затрат в регенеративную установку, руб. ; $z_{\text{т}}^{\text{уд}}$ — удельные расчетные затраты на топливо, руб/т у.т. ; $p_{\text{п}}$, $1, 2p_{\text{а}}$ — соответ-

ственно нормативный коэффициент эффективности и доля отчислений на амортизацию и текущий ремонт.

В результате расчета экономической эффективности применения в регенеративной схеме блока К-300-240ЛМЗ смешивающих подогревателей низкого давления ПНД-1С и ПНД-2С получено, что суммарное увеличение мощности турбоустановки за счет устранения недогрева в ПНД-1 и ПНД-2 и увеличения расхода пара на ПНД-1С, ПНД-2С и ПНД-3 (вследствие уменьшения вытеснения в них пара) в схеме рис. 3 составит примерно 1515 кВт, а годовая экономия топлива и расчетных затрат — соответственно 3350 т у.т. и 91 000 руб. При этом затраты на смешивающие подогреватели принимались в размере 10 тыс. руб. из расчета изготовления их на месте, т. е. как некомплектная поставка. Фактически смешивающие ПНД гораздо дешевле поставляемых поверхностных.