

Регулирование режимов работы мини-ТЭЦ с противоаварийными турбинами при работе на отопительную нагрузку

В [1] проведено сравнительное исследование тепловых схем мини-ТЭЦ, создаваемых на базе существующих котельных, с точки зрения максимально возможной выработки электрической энергии противоаварийными паровыми турбинами. Основной тепловой нагрузкой, как правило, является нагрузка систем отопления и вентиляции, величина которой при изменении температуры наружного воздуха в течение отопительного периода меняется в 4-5 раз. Выбор мощности паровых турбин определяется необходимостью высокой загрузки турбоагрегатов в течение отопительного периода. В связи с этим обычно пароводяные подогреватели сетевой воды мини-ТЭЦ большую часть отопительного периода работают в базовом режиме при постоянной номинальной электрической мощности турбоагрегатов, при этом оборудование котельного зала обеспечивает пиковую часть сезонной тепловой нагрузки. Работа пароводяных подогревателей мини-ТЭЦ происходит при переменной температуре охлаждающей обратной сетевой воды в диапазоне 30-70°C. Площадь поверхности теплообмена сетевых подогревателей мини-ТЭЦ рассчитывается для минимального температурного напора между паром и охлаждающей водой, соответствующего расчетной температуре наружного воздуха и максимальной температуре обратной сетевой воды, равной 70°C. Очевидно, что неизменность электрической мощности мини-ТЭЦ при переменной температуре обратной сетевой воды может быть обеспечена только при проведении регулировочных мероприятий на мини-ТЭЦ. В настоящей статье исследуется работа мини-ТЭЦ на переменных режимах. Под переменным режимом понимается стационарная работа оборудования мини-ТЭЦ на режиме, отличном от расчетного.

Процесс передачи теплоты в теплообменной группе мини-ТЭЦ описывается системой уравнений теплопередачи и теплового баланса для пара и воды в виде

$$Q = k F \Delta t_{\text{лог}} = r_{\text{п}} G_{\text{п}} x_2 = c_p G_c \Delta t, \quad \Delta t_{\text{лог}} = \frac{t_{\text{пр}} - t_{\text{обр}}}{\ln \left(\frac{t_s - t_{\text{обр}}}{t_s - t_{\text{пр}}} \right)}, \quad \Delta t = t_{\text{пр}} - t_{\text{обр}}, \quad (1)$$

а также системой уравнений для мощности турбоагрегатов:

$$N_{\text{эл}} = \eta_{\text{э}} \eta_{\text{мех}} G_{\text{п}} (h_0 - h_2), \quad h_2 = h_0 - \eta_i [h_2' (1 - x_{2t}) + h_2'' x_{2t}], \quad x_{2t} = \frac{s_0 - s_2'}{s_2'' - s_2'}, \quad x_2 = \frac{h_2 - h_2'}{h_2'' - h_2'}, \quad (2)$$

где Q – тепловая мощность теплообменной группы; k – коэффициент теплопередачи; F – площадь поверхности теплообмена; $\Delta t_{\text{лог}}$ – среднелогарифмический температурный напор между паром и охлаждающей сетевой водой; $r_{\text{п}}$ – удельная теплота парообразования воды; $G_{\text{п}}$, G_c – расход пара через турбины и расход обратной сетевой воды через теплообменную группу; x_2 , x_{2t} – значения степени сухости пара на выходе из турбин реальное и теоретическое (в расчетах $x_2 > 0.85$); c_p – удельная массовая теплоемкость воды; $\Delta t = t_{\text{пр}} - t_{\text{обр}}$ – нагрев сетевой воды в теплообменной группе от температуры обратной сетевой воды $t_{\text{обр}}$ до температуры прямой воды мини-ТЭЦ $t_{\text{пр}}$; t_s – температура насыщенного пара, соответствующая противоаварийному давлению p_2 ; $N_{\text{эл}}$ – электрическая мощность турбоагрегатов; $\eta_{\text{э}}$, $\eta_{\text{мех}}$, η_i – к.п.д. электрогенератора и механический к.п.д. привода турбоагрегата, внутренний к.п.д. турбины, в расчетах принимались значения $\eta_{\text{э}} = 0.95$, $\eta_{\text{мех}} = 0.99$, $\eta_i = 0.75$; h_0 , h_2 – удельная энтальпия пара на входе и на выходе из турбин; h_2' , h_2'' – удельная энтальпия насыщенной жидкости и насыщенного пара при противоаварийном давлении p_2 ; s_0 – удельная энтропия пара на входе в турбины; s_2' , s_2'' – удельная энтропия насыщенной жидкости и насыщенного пара на выходе из турбин.

На переменных режимах, в том числе и при перегрузке, принимается прямая пропорциональная зависимость мощности турбины от расхода пара через нее в виде $N_{\text{эл}} = C G_{\text{п}}$. Такое до-

пущение с высокой точностью справедливо при сопловом регулировании мощности турбины и с меньшей точностью – при дроссельном регулировании.

В соответствии с СП 41-101-95 “Проектирование тепловых пунктов” коэффициент теплопередачи k (Вт/м²·К) для пароводяных горизонтальных подогревателей тепловых сетей по ОСТ 108.271.105 определяется следующим образом:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{нак}}{\lambda_{нак}} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

$$\alpha_n = 1.16 \frac{(4320 + 47.54t_s - 0.14t_s^2)}{\sqrt[4]{md_n(t_s - t_{ст})}},$$

$$\alpha_2 = 1.16(1210 + 18t_{cp}^H - 0.038(t_{cp}^H)^2) \frac{w_{тр}^{0.8}}{d_{вн}^{0.2}},$$
(3)

где α_n – коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке трубы; α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к воде; коэффициент теплопроводности латунных трубок $\lambda_{ст}=106$ Вт/м·К; толщина накипи $\delta_{нак}=0-0.001$ м, в расчетном режиме принята равной 0; коэффициент теплопроводности накипи $\lambda_{нак}=2.3$ Вт/м·К; m – приведенное число трубок, принято $m=27$; $d_n, d_{вн}$ – наружный и внутренний диаметры трубок, в расчетах принималось $d_n=16$ мм, $d_{вн}=14$ мм; $t_{ст}$ – температура стенок трубок; t_{cp}^H – средняя температура охлаждающей воды; $w_{тр}$ – скорость движения воды в трубках, в расчетном режиме принята равной 1.5 м/с.

Анализ приведенной системы уравнений в условиях постоянной электрической мощности и переменной температуры обратной сетевой воды показывает, что регулирование процесса конденсации пара можно производить с помощью следующих мероприятий, применяя их, как по отдельности, так и совместно: изменение расхода охлаждающей сетевой воды через теплообменную группу мини-ТЭЦ, изменение площади теплообмена за счет вывода из работы части теплообменников, изменение величины противодавления турбин.

В настоящей статье приводятся количественные характеристики каждого из названных способов регулирования при изменении температуры обратной сетевой воды в диапазоне 30-70⁰С.

Изменение мощности мини-ТЭЦ в течение отопительного периода при отсутствии регулировочных мероприятий.

При работе без отключения теплообменников при снижении температуры обратной сетевой воды от 70 до 30⁰С и расчетном нагреве 15⁰С, независимо от схемы включения теплообменников по сетевой воде, должно произойти практически линейное возрастание мощности теплообменной группы, турбоагрегатов и расхода пара для противодавления 0.12 МПа до 184% от расчетного значения, для 0.2, 0.4 и 0.7 МПа аналогичные значения равны 153, 134 и 124% соответственно. Следует иметь в виду приближенность этих значений, особенно для низких противодавлений, в связи с приближенным характером линейной зависимости мощности турбин от расхода пара при значительном их изменении. Достижимые значения мощностей мини-ТЭЦ определяются способностью турбоагрегатов работать на нагрузках, превышающих номинальные значения.

Режимы работы при изменении расхода охлаждающей сетевой воды через теплообменную группу мини-ТЭЦ.

Реализация переменного расхода обратной сетевой воды через теплообменную группу мини-ТЭЦ при сохранении противодавления и площади теплообмена возможна при установке общей обводной регулировочной арматуры в параллель всей теплообменной группе, либо параллельно каждому теплообменнику. Следует отметить, что при значительных диаметрах трубопроводов тепловой сети (порядка 400 мм и выше), числе подогревателей больше двух стоимость регулировочной арматуры во втором случае существенно ниже. Сравнение переменных режимов работы производится с базовым расчетным режимом, при котором температура обратной сетевой воды на входе в теплообменную группу 70⁰С, на выходе 85⁰С, что определяется допустимым значением температуры на входе в сетевые насосы (для широко распространенных

сетевых насосов типа “К”, “КМ” и “Д” предельная температура воды в зависимости от исполнения находится в пределах 85-105°C).

Открытие регулирующей арматуры обвода изменяет расход сетевой воды в φ раз, $\varphi = \frac{G_c}{G_c^p}$. Тогда условие сохранения электрической мощности при постоянном значении противо-
давления имеет вид:

$$\Delta t_{\text{лог}} \cdot k = \Delta t_{\text{лог}}^p \cdot k^p, \quad (4)$$

или с учетом (1) сводится к уравнению относительно φ :

$$\varphi = \frac{k}{k^p} \cdot \frac{\ln\left(\frac{t_s^p - t_{\text{об}}^p}{t_s^p - t_{\text{об}}^p - \Delta t^p}\right)}{\ln\left(\frac{t_s^p - t_{\text{об}}^p}{t_s^p - t_{\text{об}}^p - \frac{1}{\varphi} \cdot \Delta t^p}\right)} \quad (5)$$

и уравнению для нахождения величины нагрева сетевой воды в теплообменниках $\Delta t = \Delta t^p / \varphi$.

В уравнениях (4)-(5) величины с индексом «р» соответствуют режиму работы на расчетном режиме ($t_{\text{об}}^p = 70^\circ\text{C}$, $\Delta t^p = 15^\circ\text{C}$, $w_{\text{тр}}^p = 1.5$ м/с, $\delta_{\text{нак}}^p = 0$ мм, t_s^p соответствует давлениям 0.12, 0.2, 0.4 и 0.7 МПа), изменение коэффициента теплопередачи определяется в соответствии с (3).

На рис.1 приведены значения относительного расхода сетевой воды в зависимости от температуры обратной сетевой воды для различных номинальных значений противо-
давления турбоагрегатов. Если на мини-ТЭЦ установлены турбоагрегаты с различным противо-
давлением, то для группы теплообменников каждого турбоагрегата необходимо организовывать обвод с регулированием расхода сетевой воды в соответствии с (5).

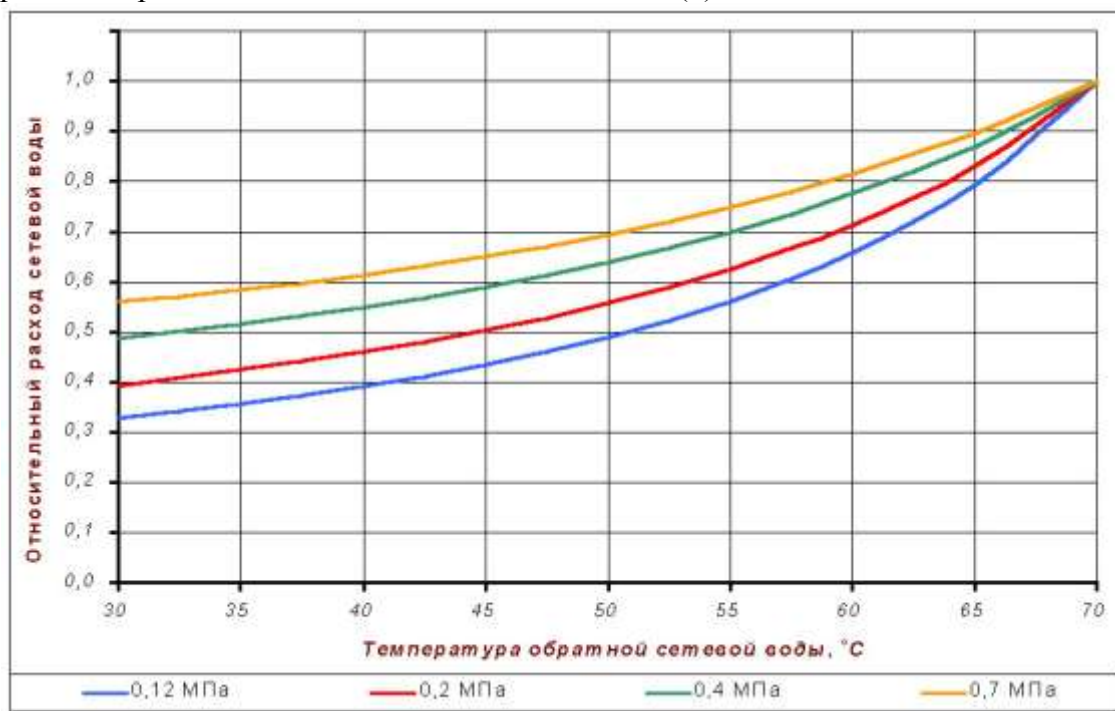


Рис. 1. Изменение относительного расхода сетевой воды на мини-ТЭЦ в зависимости от температуры обратной сетевой воды для различных значений противо-
давления турбоагрегатов.

Тепловая мощность теплообменников и расход пара через них при таком способе регули-
рования режима работы остаются неизменными. В сравнении с расчетным режимом в зави-
симости от противо-
давления в диапазоне 0.12-0.7 МПа при температуре обратной сетевой воды 30°C расход сетевой воды составляет 33-56% от номинального значения, коэффициент тепло-
передачи уменьшается на 45-28%. В зависимости от противо-
давления нагрев воды в теплооб-

менниках увеличивается с 15 до 46-27⁰С (рис. 2). Это связано с тем, что в течение отопительного периода при неизменном количестве теплоты, передаваемом сетевой воде в теплообменной группе, ее расход снижается в 3-1.8 раза.

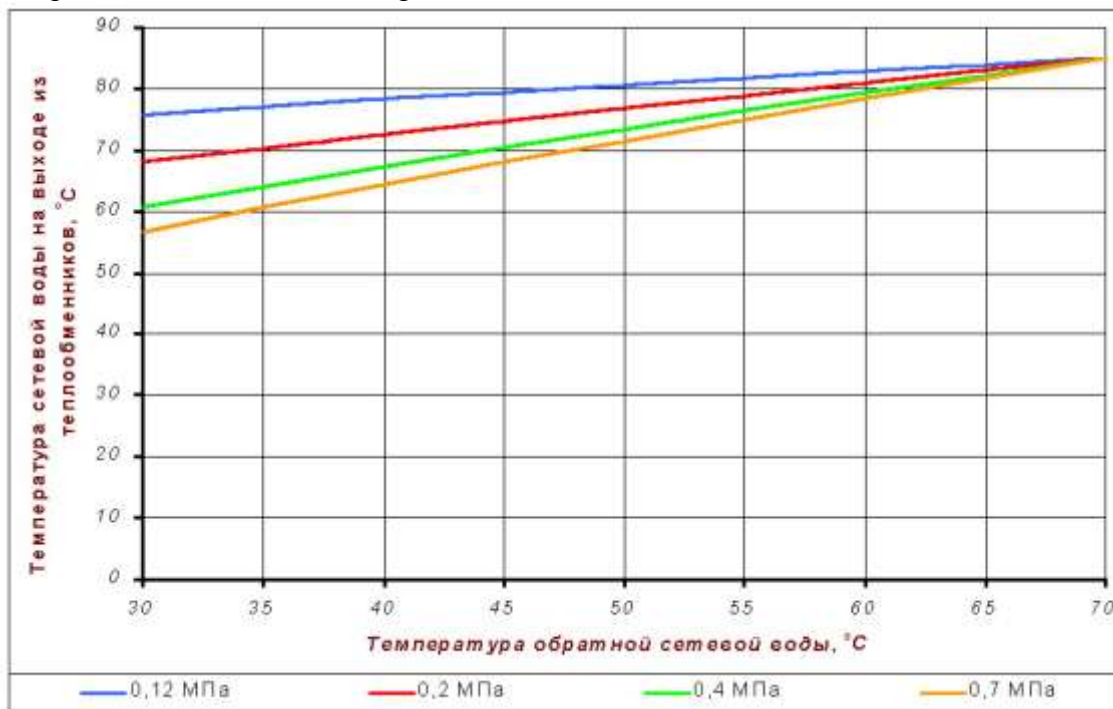


Рис. 2. Изменение температуры сетевой воды на выходе из теплообменников мини-ГЭЦ в зависимости от температуры обратной сетевой воды для различных значений противодавления турбоагрегатов.

При изменении значения расчетного нагрева сетевой воды в теплообменниках от 10 до 25⁰С для противодавления 0.12 МПа и температуры обратной воды 30⁰С относительный расход сетевой воды составляет 31-39% от номинального значения (рис. 3). При наличии накипи на поверхности теплообмена толщиной 1 мм при номинальном нагреве сетевой воды 15⁰С, температуре обратной сетевой воды 30⁰С и противодавлении 0.12 МПа необходимый расход сетевой воды составляет 25% от его значения при температуре обратной сетевой воды 70⁰С, при этом коэффициент теплопередачи падает в 3.5 раза в сравнении с расчетным режимом.

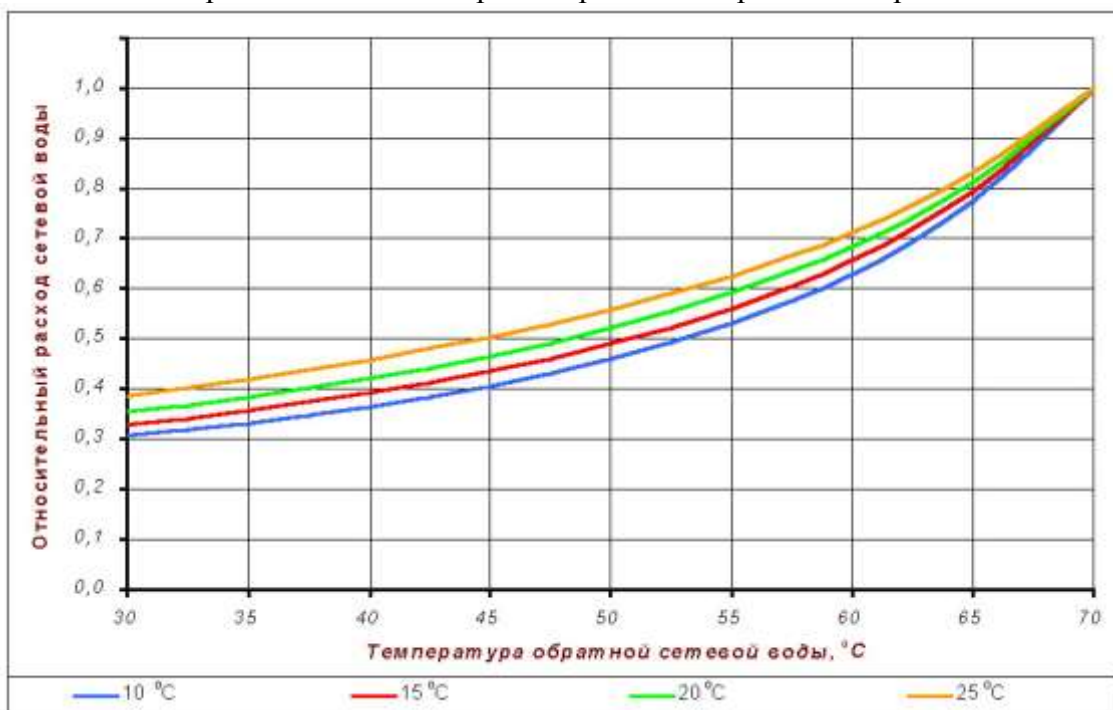


Рис. 3. Изменение относительного расхода сетевой воды на мини-ГЭЦ

Режимы работы при изменении количества работающих подогревателей.

Режимы работы подогревателей мини-ТЭЦ зависят от количества включенных теплообменников. С уменьшением температуры обратной сетевой воды возрастает тепловая мощность теплообменной группы, расход пара и электрическая мощность. В связи с этим при увеличении электрической мощности (расхода пара) в сравнении с номинальным значением на заданное количество процентов производится последовательное отключение подогревателей при неизменных общем расходе сетевой воды и противодавлении турбин. При этом предполагается, что турбогенераторы могут длительно работать на новых режимах.

При наиболее часто применяемом параллельном подключении подогревателей по сетевой воде отключение одного из них приводит к перераспределению расходов сетевой воды между остальными подогревателями. В результате происходит скачкообразное уменьшение общей площади поверхности теплообмена, мощности теплообменной группы, расхода пара и электрической мощности. При этом также скачкообразно увеличиваются тепловая мощность каждого подогревателя, коэффициент теплопередачи, нагрев сетевой воды.

Работа подогревателей при изменении температуры обратной сетевой воды описывается системой уравнений:

$$\frac{N_{эл}}{N_{эл}^p} = \frac{Q}{Q^p} = \frac{G_{п}}{G_{п}^p} = \frac{\Delta t}{\Delta t^p} = \frac{k}{k^p} \cdot \frac{n-z}{n} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t^p} \cdot \frac{\ln\left(\frac{t_s^p - t_{об}^p}{t_s^p - t_{об}^p - \Delta t^p}\right)}{\ln\left(\frac{t_s^p - t_{об}^p}{t_s^p - t_{об}^p - \Delta t}\right)} = 1 + \beta. \quad (6)$$

где индексу “р” соответствует значение параметра на расчетном режиме; n и z – общее количество подогревателей и отключенное количество подогревателей; β - относительное увеличение мощности теплообменной группы, электрической мощности турбоагрегатов, расхода пара.

Перераспределение расходов сетевой воды на подогреватели увеличивает расход воды на каждый работающий подогреватель в $\frac{n}{n-z}$ раз, $\frac{G_{cl}}{G_{cl}^p} = \frac{n}{n-z}$. Изменение коэффициента теплопередачи определяется в соответствии с (3).

Температура обратной сетевой воды связана с увеличением тепловой мощности следующим образом:

$$t_{об} = t_s^p - \frac{C}{C-1} \cdot (1 + \beta) \cdot \Delta t^p, \text{ где } C = \left(\frac{t_s^p - t_{об}^p}{t_s^p - t_{об}^p - \Delta t^p}\right)^{\frac{k \cdot n - z}{k^p \cdot n}}. \quad (7)$$

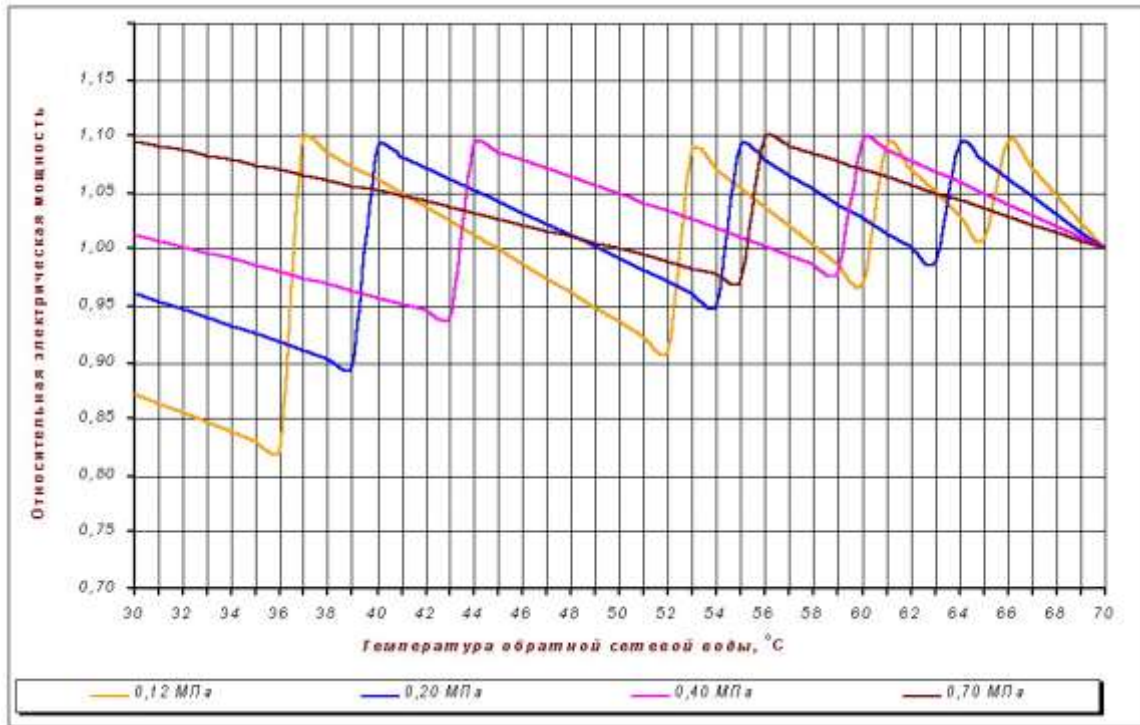
Из (7) видно, что для конкретного количества установленных подогревателей значение температуры обратной сетевой воды, при котором производится отключение, зависит от значений расчетных температур на входе и выходе из подогревателя, числа оставшихся в работе подогревателей, противодавления турбин, допускаемого увеличения мощности мини-ТЭЦ. В расчетах условием отключения очередного подогревателя принималось увеличение мощности на 10% ($\beta=0.1$). Значения температур обратной сетевой воды, при которых должно осуществляться отключение подогревателей, для типичных значений противодавления турбин приведены в таблице 1 (значения температур указаны с точностью до градуса).

При отключении (z+1)-го подогревателя электрическая мощность, тепловая мощность и расход пара на мини-ТЭЦ снижаются в соответствии с (6) при замене z на z+1 и температуре обратной сетевой воды, равной ее значению перед выключением подогревателя.

Таблица 1. Температуры обратной сетевой воды, соответствующие отключению z из n параллельно включенных подогревателей, при типичных значениях противодавлений турбин, $\Delta t^p=15^0C$, $\beta=0.1$.

z, шт.	Температура обратной сетевой воды, °С											
	n=2				n=4				n=6			
	0,12 МПа	0,2 МПа	0,4 МПа	0,7 МПа	0,12 МПа	0,2 МПа	0,4 МПа	0,7 МПа	0,12 МПа	0,2 МПа	0,4 МПа	0,7 МПа
1	66	64	60	56	66	64	60	56	66	64	60	56
2	-	-	-	-	57	48	-	-	61	55	44	-
3	-	-	-	-	37	-	-	-	53	41	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	37	-	-	-

На рис. 4 показаны зависимости изменения электрической мощности турбоагрегатов для разного общего количества подогревателей мини-ТЭЦ при изменении температуры обратной сетевой воды и последовательном отключении теплообменников, параллельно соединенных по сетевой воде. Отключение последующего теплообменника приводит к большему падению тепловой мощности теплообменной группы и электрической мощности мини-ТЭЦ, чем предыдущего теплообменника. При меньшем противодавлении количество отключаемых теплообменников больше. При этом скорость воды в трубках возрастает, существенно увеличиваются потери давления по сетевой воде в теплообменной группе. Например, при противодавлении 0,12 МПа, n=6 и n=4 скорость воды в трубках в исследованном диапазоне температур обратной сетевой воды возрастает от 1,5 до 4,5 и 6 м/с соответственно, что приведет к увеличению потерь давления на теплообменной группе в 9-16 раз. В этом случае можно рекомендовать выбор расчетного режима в теплообменниках при скорости воды около 0,5 м/с.



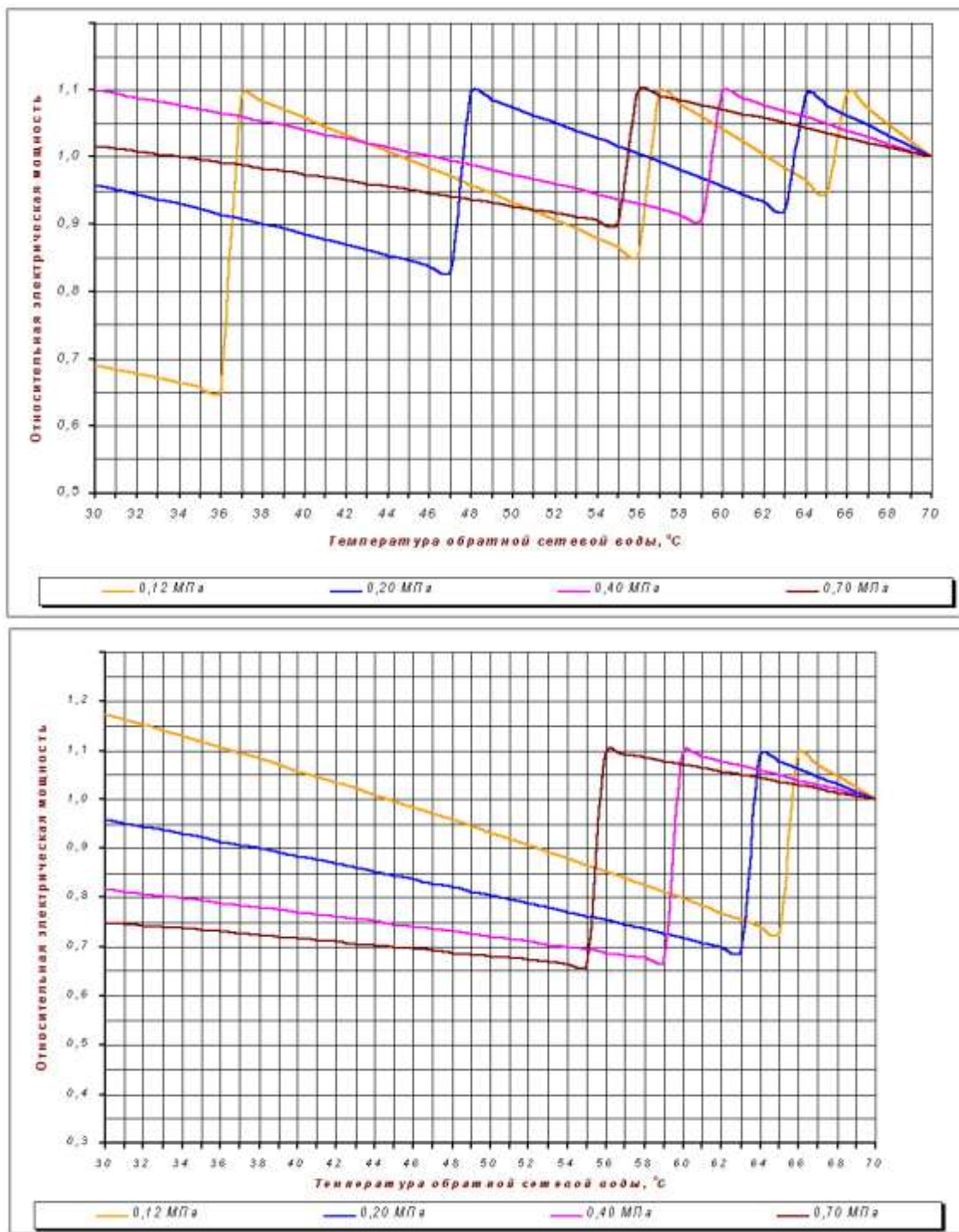


Рис. 4. Изменение мощности мини-ТЭЦ в зависимости от температуры обратной сетевой воды и последовательном отключении теплообменников, включенных параллельно по сетевой воде: а) $n=6$, б) $n=4$, в) $n=2$.

При $n=2$ диапазон изменения расхода пара и мощности мини-ТЭЦ при отключении теплообменника составляет 45%, при противодавлении 0.12 МПа после отключения первого теплообменника мощность второго теплообменника при снижении температуры обратной сетевой воды до 30°C возрастает до 117% от номинального значения мощности теплообменной группы.

При $n=4$ и $n=6$ для противодавлений 0.2-0.7 МПа диапазон изменения тепловой и электрической мощности при регулировании отключением теплообменников уменьшается до 28%.

Таким образом, большее количество установленных теплообменников, как и следовало ожидать, позволяет производить более точную регулировку мощности мини-ТЭЦ при отсутствии обводной регулировочной арматуры по сетевой воде.

Для последовательной схемы соединения теплообменников мини-ТЭЦ по сетевой воде отключение теплообменников происходит при более низкой температуре сетевой воды, при от-

ключении равного количества теплообменников наблюдается более значительное снижение тепловых и электрических мощностей в сравнении с параллельной схемой (рис. 5). В этом случае при отключении теплообменников скорость воды в трубах не изменяется.

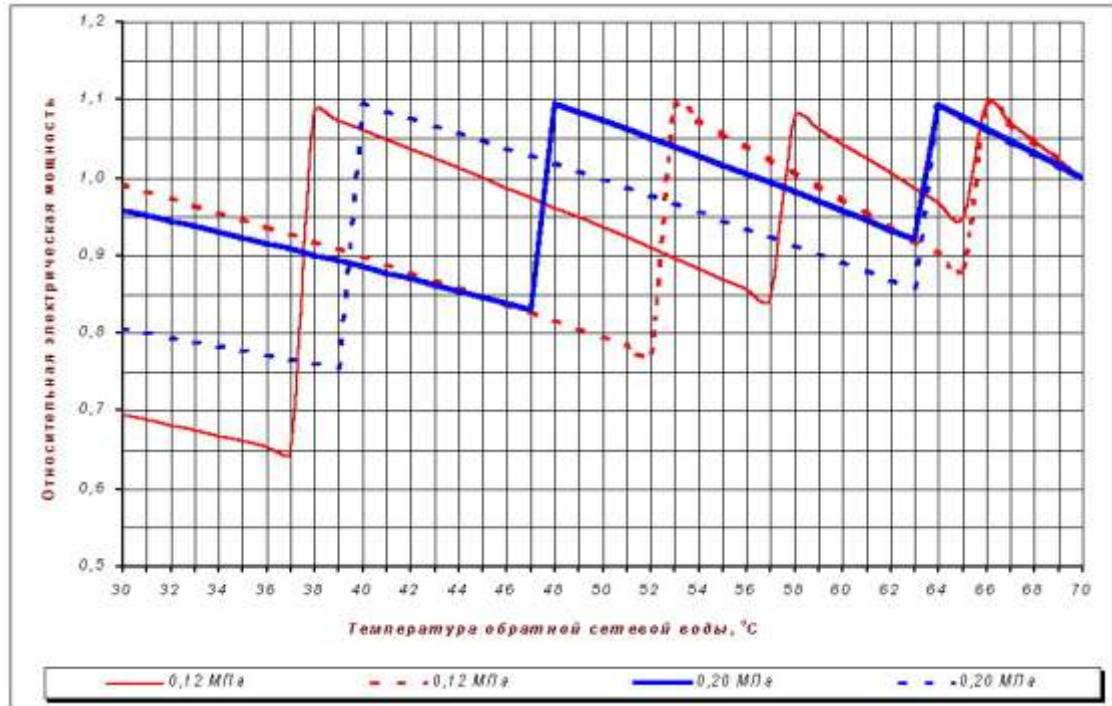


Рис. 5. Изменение мощности мини-ТЭЦ в зависимости от температуры обратной сетевой воды и последовательном отключении теплообменников, включенных последовательно (сплошные линии) и параллельно (пунктирные линии) по сетевой воде ($n=4$).

Режимы работы при изменении противодавления турбин.

При понижении температуры обратной сетевой воды сохранение мощности турбоагрегатов возможно за счет изменения противодавления турбин. Очевидно, что возможности регулирования противодавления ограничены в связи с тем, что для большинства выпускаемых противодавленческих паровых турбин диапазон регулирования, рекомендуемый заводом-изготовителем, обычно не превышает 0,3 МПа.

Система уравнений в условиях постоянной электрической мощности, неизменных значений расхода сетевой воды и площади теплообмена для соплового регулирования турбин примет вид:

$$\frac{k}{k^p} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t^p} \cdot \frac{\ln\left(\frac{t_s^p - t_{обр}^p}{t_s^p - t_{обр}^p - \Delta t^p}\right)}{\ln\left(\frac{t_s - t_{обр}}{t_s - t_{обр} - \Delta t}\right)} = \frac{\Delta t}{\Delta t^p} = \frac{G_n}{G_n^p} \cdot \frac{r_n}{r_n^p} \cdot \frac{x_2}{x_2^p} = \gamma, \quad \frac{G_n}{G_n^p} = \frac{h_0 - h_2^p}{h_0 - h_2}, \quad (8)$$

где γ - относительное изменение тепловой мощности мини-ТЭЦ. Приведенная система уравнений в первом приближении справедлива и для дроссельного регулирования.

Решение системы уравнений (8) имеет вид несимметричных парабол в координатах p_2 , $t_{обр}$ для различных значений номинальных противодавлений (рис. 6). С изменением температуры обратной сетевой воды сохранение мощности турбоагрегатов возможно при проведении регулирования двумя способами: при увеличении противодавления, расхода пара и тепловой мощности теплообменной группы, либо при их уменьшении в соответствии с приведенными зависимостями. Один из этих способов регулирования сопровождается начальным скачком противодавления.

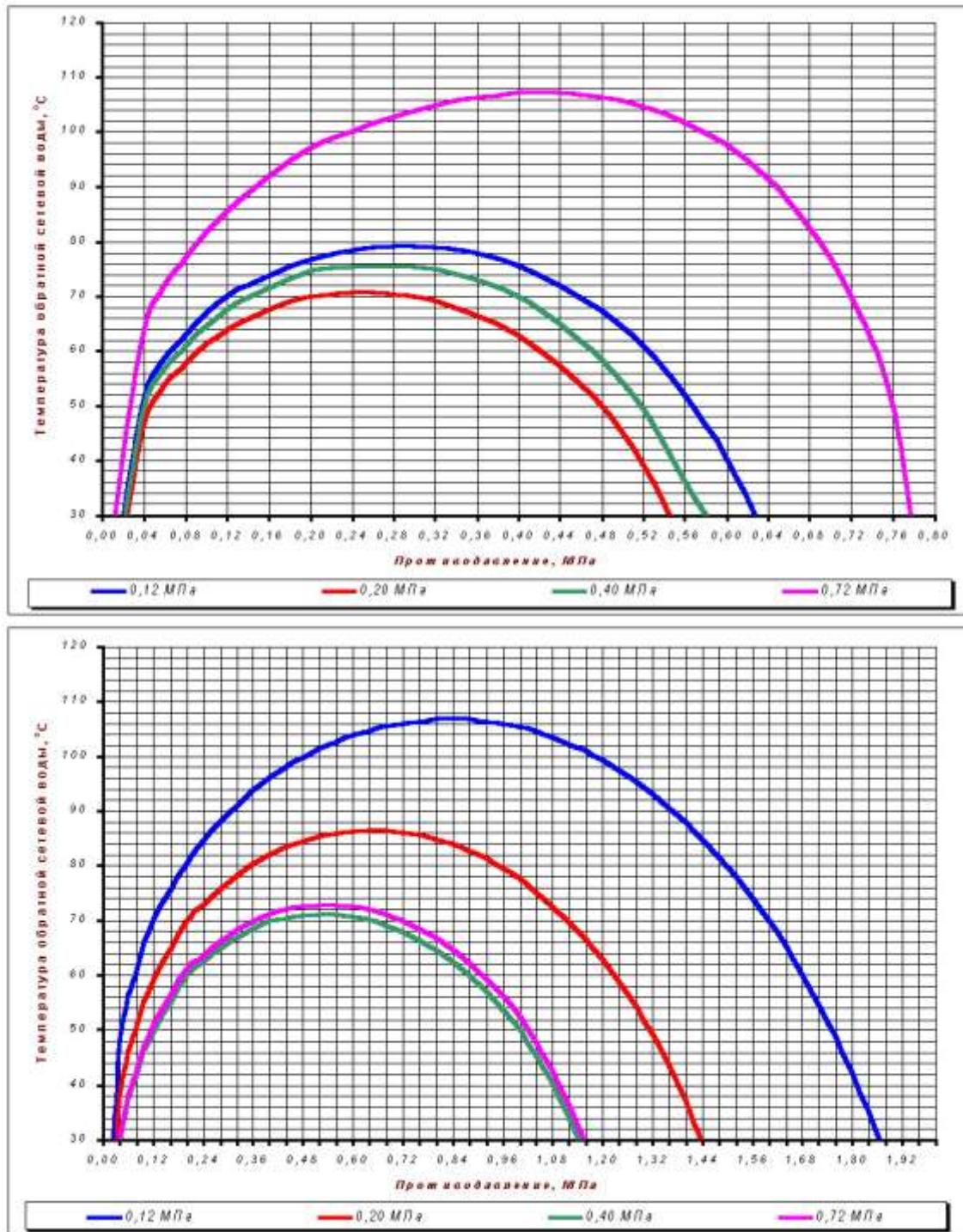


Рис. 6. Изменение противодавления турбин в зависимости от температуры обратной сетевой воды для заданной мощности турбин: а) $p_0=1,3$ МПа, $t_0=191^\circ\text{C}$; б) $p_0=3,4$ МПа, $t_0=435^\circ\text{C}$.

Например, для начальных параметров пара 1.3 МПа, 191°C (рис. 6а) и номинального противодавления 0.2 МПа после начального скачкообразного изменения противодавления до 0.29 МПа дальнейшее его увеличение до 0.55 МПа позволяет сохранить мощность паровых турбин при уменьшении температуры обратной сетевой воды от 70 до 30°C . Мощность теплообменной группы и расход пара в этом случае возрастают в 2 раза. Сохранение мощности турбин возможно также за счет уменьшения противодавления от 0.2 до 0.016 МПа при уменьшении мощности теплообменной группы и расхода пара в 2 раза.

С учетом разрешенного диапазона изменения противодавления изменение температуры обратной сетевой воды от 70 до 45°C должно сопровождаться увеличением противодавления от 0.2 до 0.5 МПа, изменению температуры обратной сетевой воды от 70 до 61°C соответствует также уменьшение противодавления от 0.2 до 0.1 МПа. При значениях номинального противодавления

давления 0.12 и 0.4 МПа диапазон изменения температуры обратной сетевой воды снижается до 3-5°C при падении противодействия до 0.1 МПа. Для номинального противодействия 0.7 МПа регулирование уменьшением противодействия невозможно, и, наоборот, для номинального противодействия 0.12 МПа невозможно регулирование увеличением противодействия. Для номинального противодействия 0.7 МПа увеличение давления за турбиной до 0.77 МПа сопровождается падением температуры обратной сетевой воды от 70 до 30°C.

Повышение начальных параметров пара перед турбиной уменьшает возможности регулирования за счет изменения противодействия (рис. 6б).

Совместное применение регулирования изменением противодействия и отключением теплообменников.

Регулирование отключением подогревателей характеризуется резкими падениями электрической мощности, а, значит, и уменьшением возможной годовой выработки электроэнергии. Одновременное регулирование изменением противодействия турбин и отключением подогревателей в большинстве случаев позволяет сохранить значение электрической мощности на заданном уровне в течение отопительного периода. С уменьшением температуры обратной сетевой воды противодействие изменяется плавно до своего предельного значения в соответствии с (8), затем одновременно с отключением (z+1)-го подогревателя происходит скачкообразное изменение противодействия в противоположную сторону в соответствии с (9) при сохранении значения температуры обратной воды.

$$\frac{k}{k^p} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t^p} \cdot \frac{n-z-1}{n} \cdot \frac{\ln\left(\frac{t_s^p - t_{обп}^p}{t_s^p - t_{обп}^p - \Delta t^p}\right)}{\ln\left(\frac{t_s - t_{обп}}{t_s - t_{обп} - \Delta t}\right)} = \frac{\Delta t}{\Delta t^p} = \frac{G_n}{G_n^p} \cdot \frac{r_n}{r_n^p} \cdot \frac{x_2}{x_2^p} = \gamma, \quad \frac{G_n}{G_n^p} = \frac{h_0 - h_2^p}{h_0 - h_2} \quad (9)$$

На рис. 7 показан характер изменения противодействия турбин в диапазоне до 0.2 МПа при поддержании электрической мощности и отключении подогревателей в течение отопительного периода при n=4 для параметров свежего пара 1.3 МПа, 191 °С, значений номинального противодействия 0.12 и 0.4 МПа. При уменьшении температуры обратной сетевой воды для номинального противодействия 0.12 МПа поддержание электрической мощности мини-ТЭЦ на заданном уровне при отключении теплообменников сопровождается увеличением противодействия, для 0.4 МПа – его снижением. При номинальном противодействии 0.12 МПа регулирование противодействием происходит в значительной степени в области ухудшенного вакуума, что требует применения эжекторов для нормальной работы теплообменников.

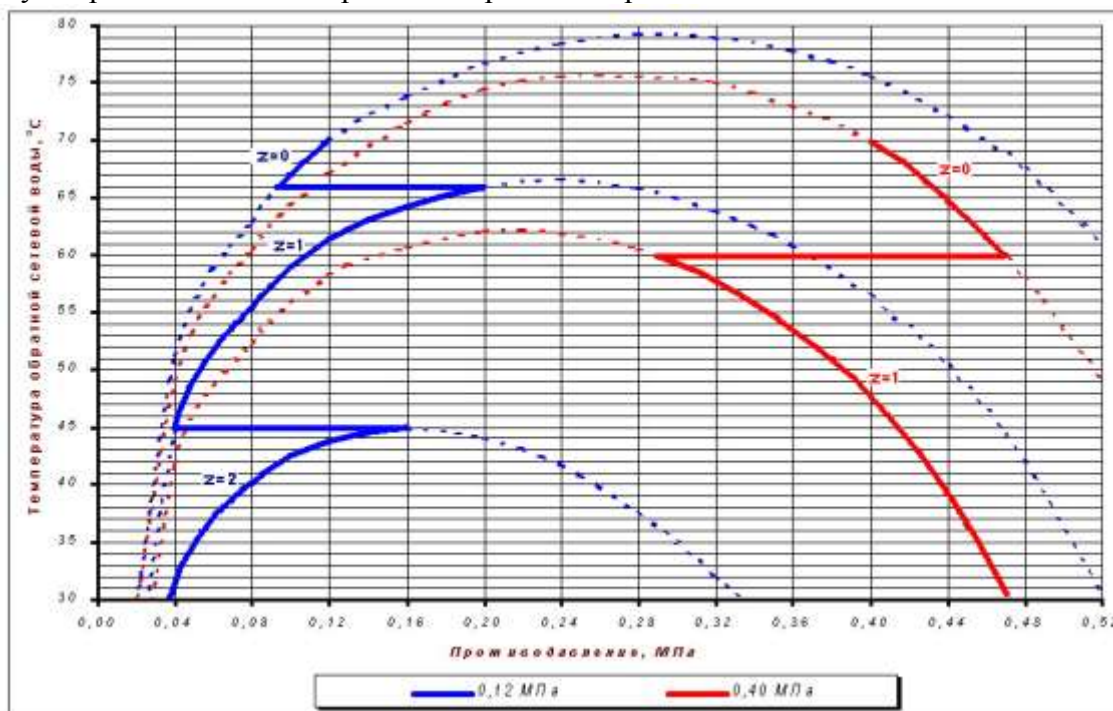


Рис. 7. Регулирование изменением противодействия турбин и отключением теплообменников в зависимости от температуры обратной сетевой воды при поддержании заданной мощности турбин ($p_0=1,3$ МПа, $t_0=191^\circ\text{C}$) при различных значениях номинального противодействия.

В случае узкого разрешенного диапазона регулирования противодействия при использовании только рассматриваемых методов регулирования сохранение мощности турбоагрегатов невозможно. На практике могут быть реализованы различные варианты изменения мощности: например, при достижении предела регулирования противодействия с дальнейшим падением температуры обратной воды происходит возрастание электрической мощности при сохранении противодействия, пока не будет достигнута очередная ветвь с заданной номинальной мощностью, соответствующая меньшему количеству теплообменников, тогда теплообменник отключается и происходит возврат к номинальной мощности мини-ТЭЦ; либо при отключении очередного теплообменника на нижнем пределе регулирования противодействия происходит падение электрической мощности, поддержание ее нового значения при регулировании противодействием и при определенной температуре обратной воды возврат к номинальному значению электрической мощности за счет скачкообразного изменения противодействия.

Выводы.

1. При использовании противодейственных паровых турбин, работающих на базе отопительной нагрузки, для сохранения электрической мощности в течение отопительного периода необходимо проведение регулировочных мероприятий на мини-ТЭЦ. В их отсутствие при снижении температуры обратной сетевой воды от 70 до 30°C и расчетном нагреве 15°C , независимо от схемы включения теплообменников по сетевой воде, должно произойти практически линейное возрастание мощности теплообменной группы, турбоагрегатов и расхода пара для противодействия $0,12$ МПа до 184% от расчетного значения, для $0,2$, $0,4$ и $0,7$ МПа – до 153 , 134 и 124% соответственно. Достижимые значения мощностей мини-ТЭЦ определяются способностью турбоагрегатов работать на нагрузках, превышающих номинальные значения.

2. Рассмотрены количественные характеристики различных способов регулирования работы теплообменной группы при сохранении электрической мощности мини-ТЭЦ: применения обводной регулировочной арматуры по сетевой воде параллельно теплообменникам мини-ТЭЦ, отключения теплообменников, изменения противодействия турбин, совместного регулирования изменением противодействия и отключением теплообменников.

3. При использовании обводной регулировочной арматуры тепловая мощность теплообменников и расход пара через них остаются неизменными. В сравнении с расчетным режимом в зависимости от противодействия в диапазоне $0,12-0,7$ МПа при температуре обратной сетевой воды 30°C нагрев воды в теплообменниках увеличивается с 15 до $46-27^\circ\text{C}$, ее расход через них снижается в $3-1,8$ раза.

4. Регулирование отключением теплообменников приводит к скачкообразному изменению мощности мини-ТЭЦ в заданных пределах. Большее количество установленных теплообменников позволяет производить более точную регулировку мощности мини-ТЭЦ при отсутствии обводной регулировочной арматуры по сетевой воде.

При числе установленных теплообменников $n=2$ диапазон изменения мощности теплообменной группы, турбоагрегатов и расхода пара составляет 45% , при $n=4$ и $n=6$ для противодействий $0,2-0,7$ МПа диапазон их изменения уменьшается до 28% .

Для последовательной схемы соединения теплообменников мини-ТЭЦ по сетевой воде отключение теплообменников происходит при более низкой температуре обратной сетевой воды, при отключении равного количества теплообменников наблюдается более значительное снижение тепловых и электрических мощностей в сравнении с параллельной схемой.

5. С изменением температуры обратной сетевой воды сохранение мощности турбоагрегатов возможно как при увеличении противодействия, расхода пара и тепловой мощности теплообменной группы, так и при их уменьшении. Рекомендуются заводами-изготовителями турбин диапазон регулирования противодействия, обычно не превышающий $0,3$ МПа, сильно ограничивает возможности регулирования работы мини-ТЭЦ за счет изменения противодействия.

6. Совместное регулирование изменением противодавления и количества работающих теплообменников в большинстве случаев позволяет сохранять на неизменном уровне электрическую мощность мини-ТЭЦ в течение отопительного периода.

Литература

1. Петрущенко В.А., Васькин В.В., “Сравнительные характеристики тепловых схем мини-ТЭЦ на базе противодавленческих паровых турбин”, “Новости теплоснабжения”, №2, 2005.