

## ГЛАВА 6. СХЕМЫ ПИТАНИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ.

### 6.1. Постановка вопроса.

Как уже отмечалось в разделе 5.2, основной исключительной особенностью конвективных поверхностей нагрева в водогрейных котлах является тот факт, что независимо от схемы движения теплоносителей относительно друг друга (по принципу прямотока – П или по принципу противотока – Z) тепловосприятие его практически не меняется. Это означает, что компоновка конвективного пучка по принципам прямо- или противотока не влияет и на температуру уходящих газов. С другой стороны эти факторы ( П и Z ) по-разному сказываются на температуре стенки поверхности нагрева со стороны дымовых газов. В случае противотока (Z) температура стенки змеевика с входящей в него температурой воды, равной  $t_{вх}$  в сечении уходящих газов будет ниже, чем в случае прямотока, где температура выходящей воды в этом же сечении газохода равна  $t_{вых} > t_{вх}$ . Такая особенность теплового режима конвективного пучка расширяет возможности его модернизации как при разработке схемы циркуляции воды в котле, так и при разработке его конструкции в целом.

Традиционные схемы циркуляции воды в котле предусматривают непрерывный процесс её подогрева по мере продвижения по тракту от входа до выхода. С другой стороны по условиям эксплуатации устанавливаются определённые ограничения по допустимым значениям температур, как на входе, так и на выходе. Это достигается путём соблюдения тепловых балансов между потоками теплоты, выделяемой при сжигании топлива и теплоты, воспринятой теплоносителем. Теряемая часть теплоты из общего баланса котла определяется в основном уровнем температуры уходящих газов, который в свою очередь в значительной мере зависит от среднего температурного уровня подогреваемой воды, т. е.  $t_{yx} \approx f(t_{cp})$ , где  $t_{cp} \approx 0,5 (t_{вх} + t_{вых})$ . Таким образом, есть основания утверждать, что при постоянных поверхностях нагрева котла имеется такая величина средней температуры воды  $t_{cp}$ , при которой будут сохраняться на допустимом (оптимальном) уровне остальные температуры:  $t_{вх}$ ,  $t_{вых}$ ,  $t_{yx}$ . Наибольший интерес в таком случае представляют режимы котла с постоянной температурой уходящих газов.

Обратимся к уравнению теплового баланса по подогреву воды в котле и запишем его так (рис. 6.1):

$$G_k(t_2 - t_1) = G_{k1}(t_{пр1} - t_1) + G_{k2}(t_3 - t_{пр2}), \quad (6.1)$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  – температуры воды на входе и выходе из котла с массовым расходом  $G_k$  до его модернизации;  $G_{k1} \approx G_{k2} \approx G_k$  – массовые расходы воды в модернизированном котле, в котором водяной тракт разделён, положим, на две части: первую с потоком воды  $G_{k1}$  и с подогревом её от  $t_1$  до  $t_{пр1}$  и вторую – с потоком воды  $G_{k2}$  и с подог-

ревом её от  $t_{\text{пр}2}$  до  $t_3$ . В таком случае средний температурный уровень воды в модернизированном котле равен

$$t_{\text{ср}}^{\text{мод}} \approx \frac{0,5[G_{\text{к}1}(t_{\text{пр}1} + t_1) + G_{\text{к}2}(t_3 + t_{\text{пр}2})]}{G_{\text{к}1} + G_{\text{к}2}} \approx 0,25(t_{\text{пр}1} + t_1 + t_3 + t_{\text{пр}2}), \quad (6.2)$$

в то время, как в котле с традиционной схемой циркуляции воды

$$t_{\text{ср}}^{\text{тр}} \approx 0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}). \quad (6.3)$$

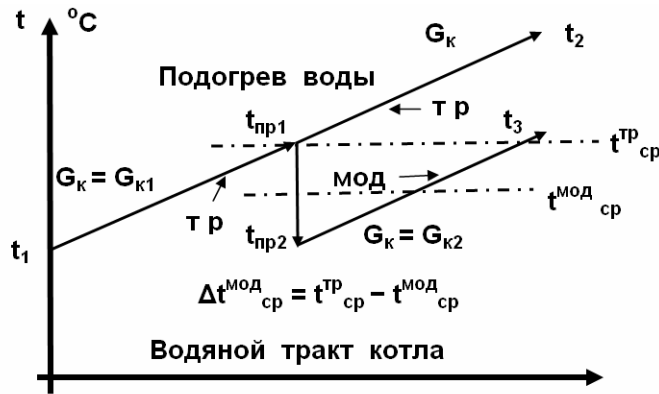


Рис. 6.1. Схема подогрева воды по традиционному (тр) и модернизированному (мод) трактам котла.

В простейшем случае (рис. 6.1.)  $t_1 \approx t_{\text{пр}2}$  и  $t_{\text{пр}1} \approx t_3$ . Тогда на основании (6.1) и (6.2) следует, что в результате модернизации водяного тракта котла средний температурный уровень воды в нём снизится на величину по-

рядка  $\Delta t_{\text{ср}}^{\text{мод}} \approx t_{\text{ср}}^{\text{тр}} - t_{\text{ср}}^{\text{мод}} \approx 0,5(t_2 - t_3) \approx 0,5(150 - 110) = 20^\circ\text{C}$ .

На основании изложенного следует, что задача снижения и последующей стабилизации температуры уходящих газов за котлом может быть решена вполне доступными средствами, не нарушая традиционных устоев, связанных с конструкцией топки и конвективных поверхностей котла. Остаётся только решить вопрос о способе и механизме для достижения этих целей, позволяющих в условиях эксплуатации выдерживать необходимую среднюю температуру  $t_{\text{ср}}^{\text{мод}}$  в котле при допустимых значениях  $t_{\text{пр}1}$ ,  $t_{\text{пр}2}$ ,  $t_3$  и  $t_{\text{ух}}$ .

## 6.2. Варианты модернизации схем циркуляции воды в водогрейных котлах.

Организация прямоточного режима работы конвективного пучка (при 2-х ходовой схеме циркуляции) была выполнена на одном из котлов ПТВМ-100 [77] путем замены «входа» на «выход». Однако широкого применения на практике такое мероприятие не получило, т.к. при этом не был исключен второй немаловажный недостаток котла: неоправданное чередование экранных и конвективных поверхностей нагрева по ходу движения воды.

Чередование экранных и конвективных поверхностей нагрева по ходу движения воды в котле, а также наличие нисходящих потоков в экранных трубах создают условия для отложения солей в радиационных поверхностях. Осуществление последовательного подогрева воды сначала в экранах топки, а затем в конвективном пучке позволяет всецело использовать подогрев холодной воды в трубах, имеющих более высокую температуру стали, чем трубы конвективного пучка. Одновременно облегчаются условия для поддержания температуры воды на входе в конвективный пучок на уровне не менее  $104-110^\circ\text{C}$ . При этом температура воды на входе в котел (экранные тубы)

может быть ниже на 10-15°C.

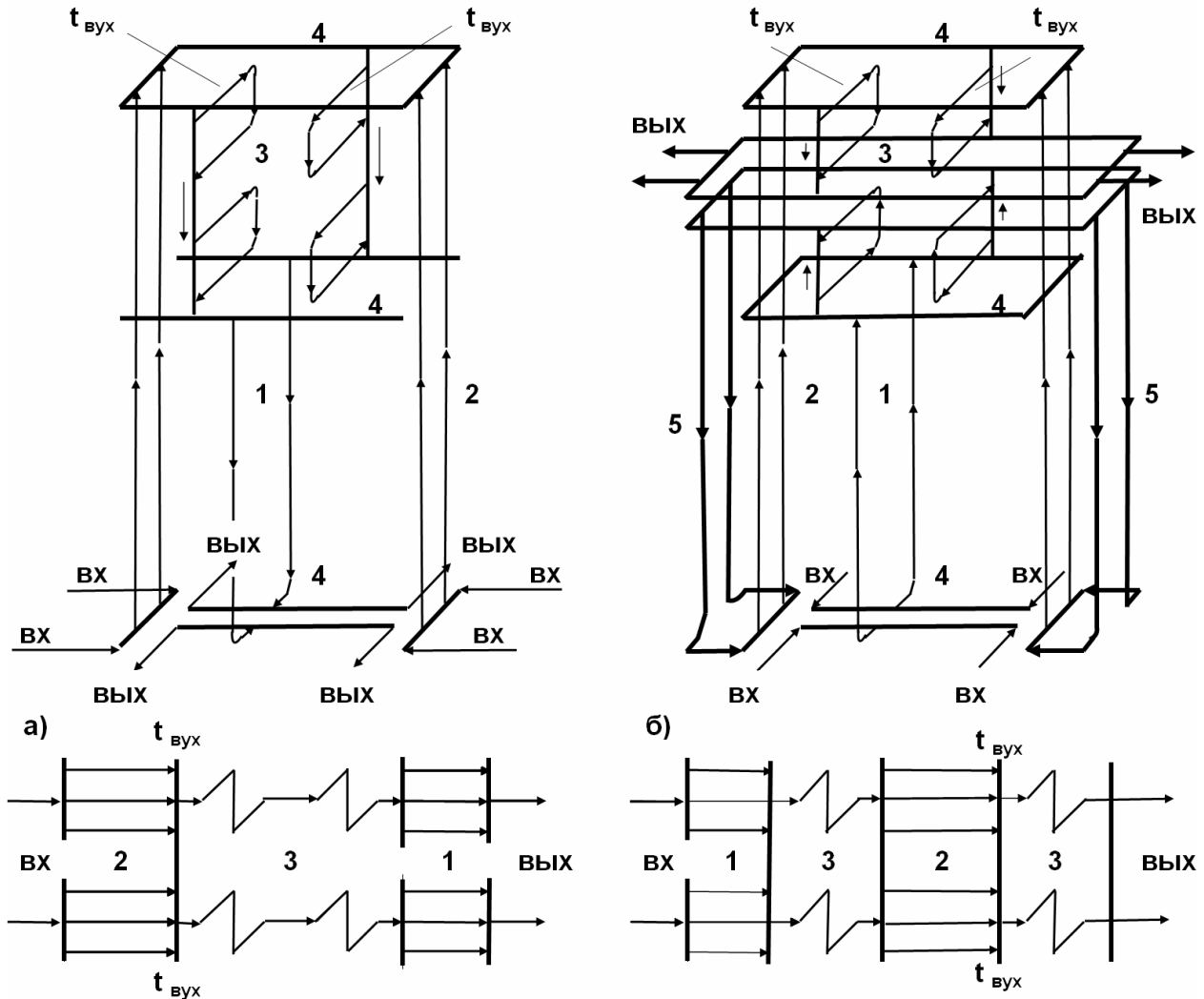


Рис. 6.2. Вариант модернизации контуров циркуляции водогрейных котлов ПТВМ-50, 100, включённых по 2-х ходовой схеме, согласно разработкам Союзтехэнерго (б) в сравнении с традиционной схемой (а). 1, 2 - экранные трубы; 3 - конвективный пучок; 4 - коллекторы; 5 - перепускные трубы;  $t_{\text{вых}}$  - температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов.

Температура уходящих газов на котлах ПТВМ при 100% нагрузке по данным нормативных характеристик равна [80]: в котлах ПТВМ-50 при сжигании мазута – 292°C, газа – 235°C; в котлах ПТВМ-100 при сжигании мазута – 230°C, газа – 185°C. Очевидно, что такая высокая температура уходящих газов представляет собой потенциальный резерв в отношении повышения экономичности работы котлов в целом. Поэтому анализ работы водогрейных котлов приводит к необходимости изменения технологии нагрева воды в них, т.е. в модернизации либо котлов в целом, либо их отдельных элементов.

На рис. 6.2 и 6.3 представлены варианты схем циркуляции воды в котлах ПТВМ-50 и ПТВМ-100, включенных по 2-х и 4-х ходовым схемам: а – традиционные варианты, б – варианты, разработанные Союзтехэнерго [81] на случай колебания давления воды в теплосети. К недостаткам такой модернизации следует отнести тот факт, что коррозионная стойкость котлов в сущности не изменилась: поверхности экранов и конвективных пучков раз-

мещены в рассечку.

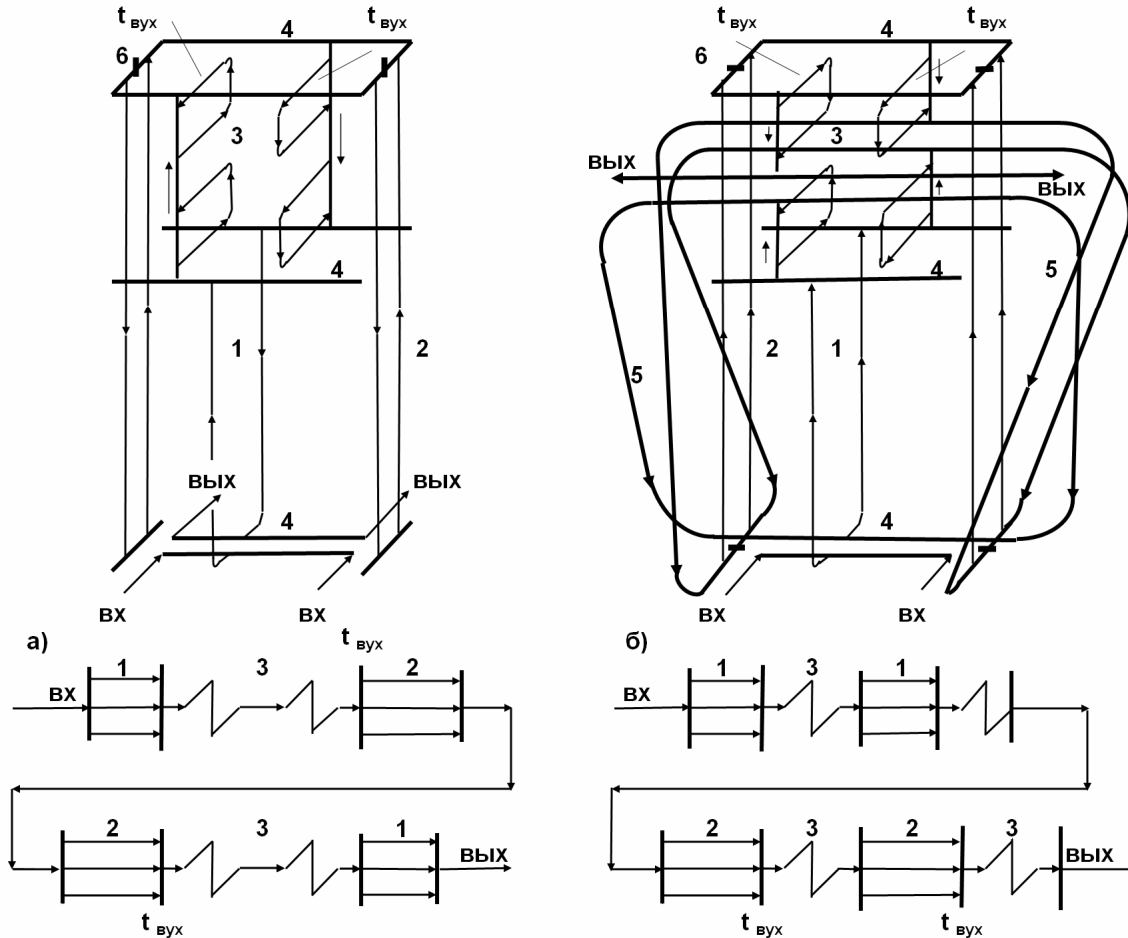


Рис. 6.3. Вариант модернизации контуров циркуляции водогрейных котлов ПТВМ-50, 100, включённых по 4-х ходовой схеме, согласно разработкам Союзтехэнерго - б в сравнении с традиционной схемой - а. 1, 2 - экранные трубы; 3 - конвективный пучок; 4 - коллекторы; 5 - перепускные трубы; 6 - заглушки;  $t_{\text{вух}}$  - температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов.

На рис. 6.4 и 6.5 представлены рекомендуемые варианты модернизации (а, б) котлов [82, 83], в которых предусмотрен последовательный подогрев воды сначала в экранах топки, затем в конвективном пучке. В вариантах на рис. 6.4 предусмотрен восходящий поток воды не только в экранах, но и в обоих конвективных пучках из учета материалов исследования, изложенных в предыдущей главе 5 (разд.5.2). Кроме того, в отличие от вариантов Союзтехэнерго (рис. 6.2б, 6.3б) в вариантах модернизации по рис.6.4, 6.5 предусматривается дополнительный ввод сетевой воды в промежуточный тракт котла (в количестве 5-15% от номинального расхода) для регулирования теплового режима работы поверхностей нагрева и тепловой нагрузки котла в целом, как это показано схематически на рис. 6.1.

Следует также отметить, что в ряде котлов традиционных конструкций движение воды между подающими и отводящими коллекторами осуществляется по схеме "Z" [53, 84]. например, на боковых экранах котлов ПТВМ-50, 100 (рис. 6.3а) при 4-х ходовой схеме циркуляции. С точки зрения уменьшения гидравлической и тепловой разверок [84] схема "П" предпочтительна. Поэтому при модернизации котла по рис. 6.5а на боковых экранах преду-

смотрен вход и выход воды между коллекторами по схеме "П", как более эффективной.

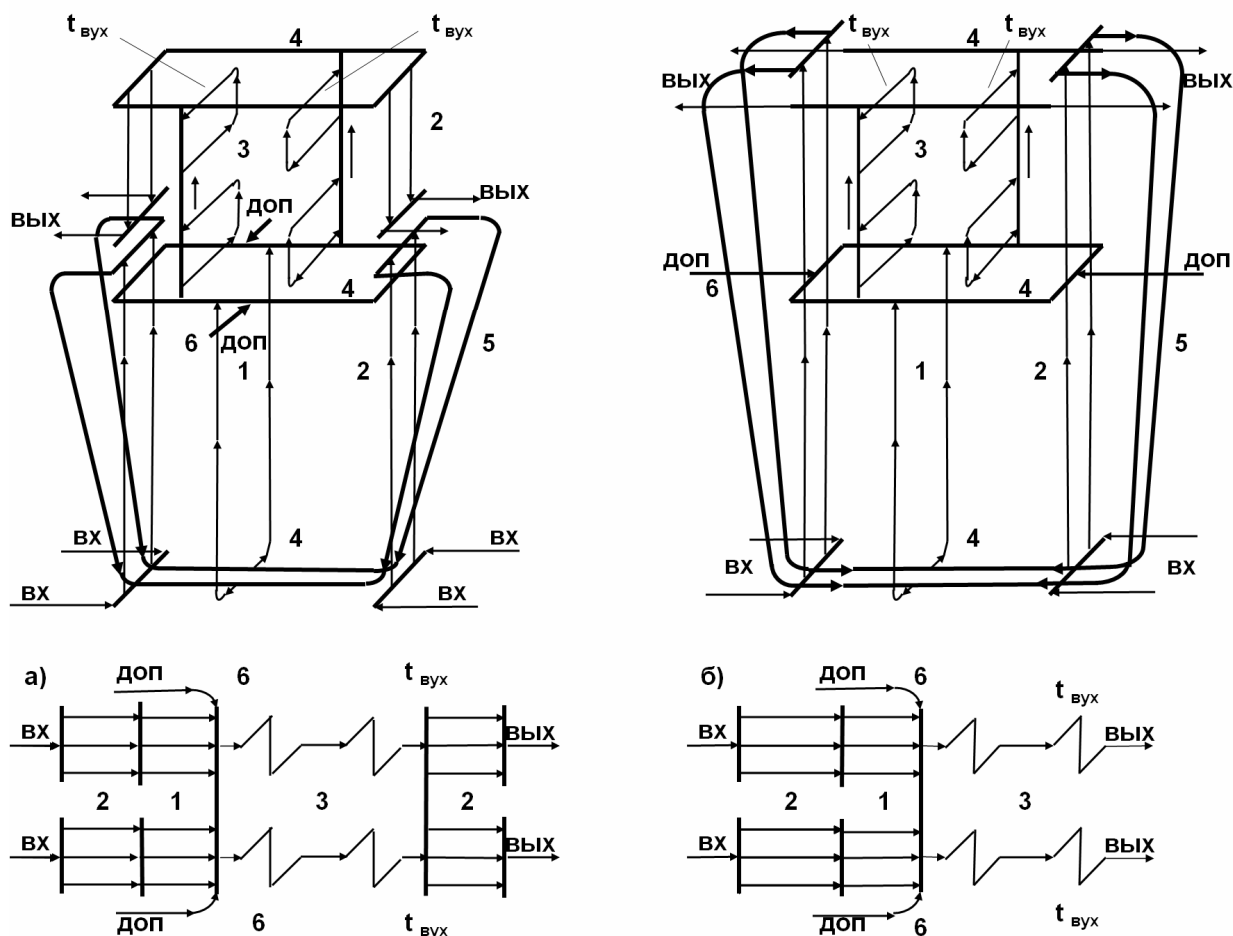


Рис. 6.4. Варианты модернизации контуров циркуляции водогрейных котлов ПТВМ-50, 100, включённых по 2-х ходовой схеме, согласно разработкам Минскэнерго. 1, 2 - экранные трубы; 3 - конвективный пучок; 4 - коллекторы; 5 - перепускные трубы; 6 - трубопроводы для дополнительной подачи воды в тракт котла;  $t_{\text{вух}}$  - температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов.

В отличие от котлов ПТВМ в котлах типа КВГМ исключено чередование экранных и конвективных поверхностей нагрева в рассечку, что является их немаловажным преимуществом. При работе по 4-х ходовой схеме здесь предусмотрен последовательный нагрев воды сначала в экранах топки, затем в конвективном пучке. При работе по 2-х ходовой схеме каждый из двух контуров (экранный и конвективный) включены по ходу воды параллельно. Наибольшей коррозии в этом случае может подвергаться нижний пакет конвективного пучка, расположенный в зоне уходящих газов и принимающий на себя сравнительно холодную воду. Поэтому независимо от схемы работы (2-х или 4-х ходовой) подачу воды в конвективную зону следует осуществлять последовательно: сначала в верхнюю часть среднего конвективного пучка, пройдя через который (рис. 6.б) вода поступает в нижний конвективный пучок, и после этого перепускными трубами подается в верхний конвективный пучок снизу. Таким образом, движение воды в среднем и нижнем конвективных пучках осуществляется вниз, а в верхнем, где температурные напоры велики – вверх.

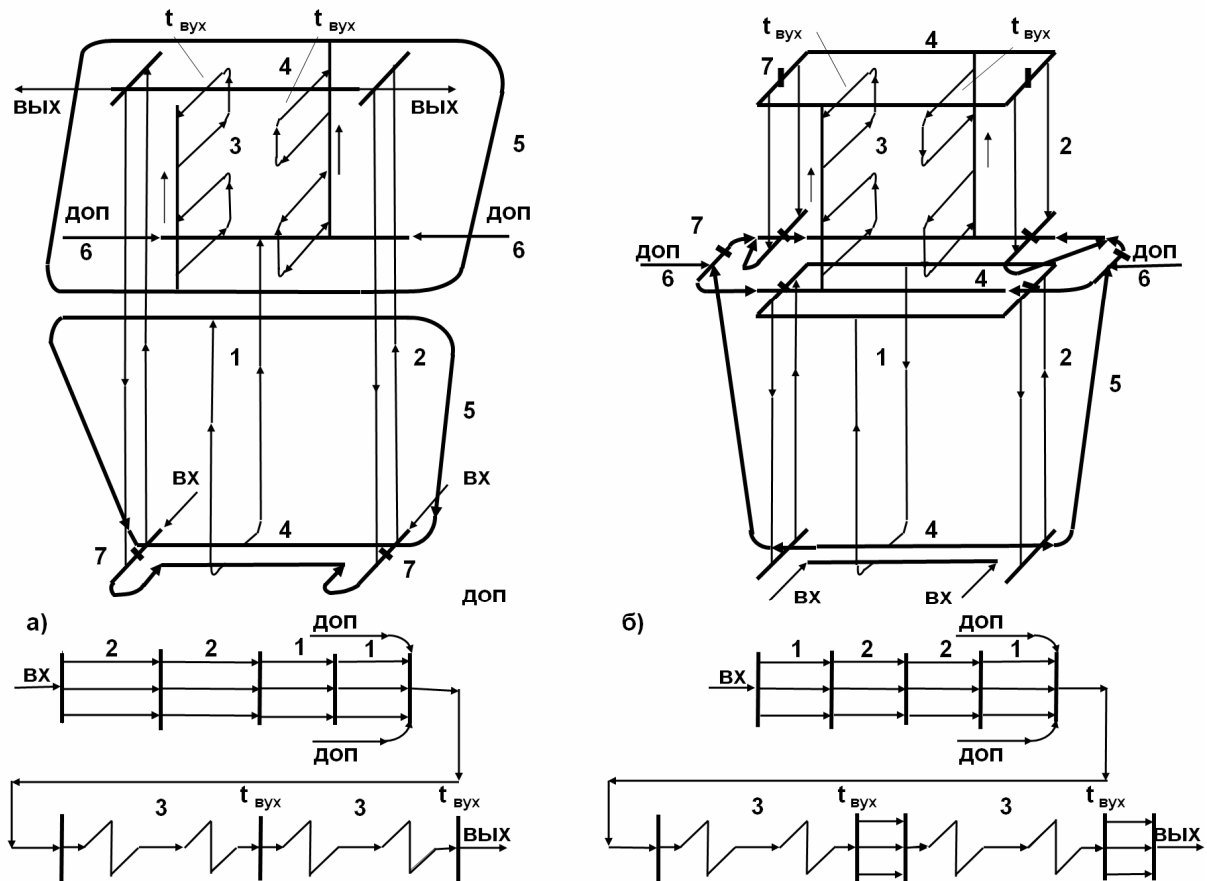


Рис. 6.5. Варианты модернизации контуров циркуляции водогрейных котлов ПТВМ-50, 100, включённых по 4-х ходовой схеме. 1, 2 - экранные трубы; 3 - конвективный пучок; 4 - коллекторы; 5 - перепускные трубы; 6 - трубопроводы для дополнительной подачи воды в тракт котла; 7 - заглушки;  $t_{\text{вых}}$  - температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов.

Увеличение коррозионной стойкости котлов типа КВГМ, работающих по 2-х ходовой схеме, можно осуществить путем организации более высокого уровня температуры воды на входе в конвективный пучок с помощью насоса рециркуляции, как это показано на рис. 6.7. Такое мероприятие позволит обеспечить предельно-допустимый уровень температуры воды в конвективном пучке и одновременно уменьшить загрузку насосов рециркуляции по сравнению со случаем работы котла по 2-х ходовой традиционной схеме. Кроме того, предлагаемая схема модернизации питания котлов типа КВГМ способствует уменьшению общего сопротивления водяного тракта котла.

Перепады температуры по отдельным поверхностям нагрева котлов можно определить по формуле:

$$\Delta t_{\Psi_{T,K}} = \frac{Q_{KT} \Psi_{\Psi}}{C G_{T,K}} = t_{\Psi_{T,K}}^{\text{ВЫХ}} - t_{\Psi_{T,K}}^{\text{ВХ}}, \quad (6.4)$$

где  $C$ ,  $G_{T,K}$  - теплоемкость воды и ее расходы через поверхности, расположенные в топке (инд. Т), и поверхности конвективного пучка (инд. К);  $t_{\Psi_{T,K}}^{\text{ВХ}}$  и  $t_{\Psi_{T,K}}^{\text{ВЫХ}}$  - температура воды на входе и выходе из исследуемой поверхности нагрева котла;  $\Psi_{\Psi}$  - долевое тепловосприятие исследуемой поверхности котла от общей его нагрузки  $Q_{KT}$ , величину которой в общем

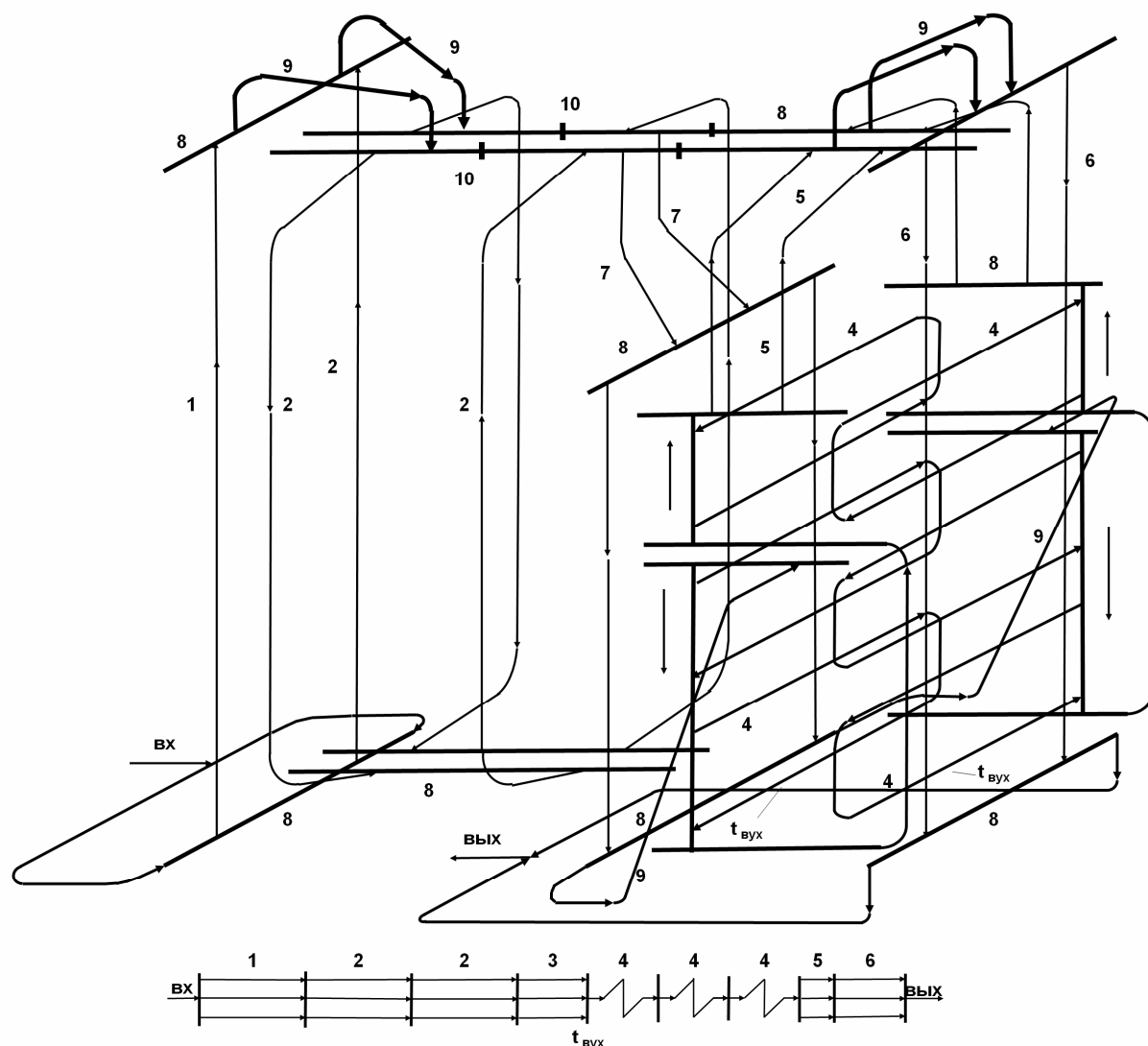


Рис. 6.6. (ИсКСПх2). Вариант модернизации контуров циркуляции водогрейных котлов типа КВГМ, включённого по 4-х ходовой схеме. 1 - фронтной экран; 2, 3 - боковые и задний экраны в топке; 4 - конвективный пучок в газоходе; 5 - боковые экраны в верхней части; газохода; 6 - экранные трубы на задней стенке газохода; 7 - фестон; 8 - коллекторы; 9 - перепускные трубы; 10 - заглушки;  $t_{\text{вых}}$  - температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов.

случае выразим так:

$$Q_{\text{КТ}} = C(G_{\text{T}} \Delta t_{\text{T}} + G_{\text{К}} \Delta t_{\text{К}}), \quad (6.5)$$

где  $\Delta t_{\text{T}}$  и  $\Delta t_{\text{К}}$  – подогрев воды по потокам в топке (т) и в конвективном пучке (к). Тогда согласно (6.4) определяем:

$$\Delta t_{\Psi_{\text{T,К}}} = G_{\text{T,К}}^{-1} \Psi_{\Psi} (G_{\text{T}} \Delta t_{\text{T}} + G_{\text{К}} \Delta t_{\text{К}}). \quad (6.6)$$

На основании анализа результатов испытаний, выполненных Союзтехэнерго [85] на котле КВГМ-100 и данных тепловых расчетов котлов типа ПТВМ-50, 100 оказалось возможным установить, что величину  $\Psi_{\Psi}$  можно с достаточной точностью представить в виде линейной функции от фактической нагрузки котла  $Q_{\text{КТ}}$ , т.е. в общем случае,

$$\Psi_{\Psi} = a_{\Psi} Q_{\text{КТ}} Q_{\text{Н}}^{-1} + b_{\Psi}, \quad (6.7)$$

где  $Q_{\text{Н}}$  – номинальная нагрузка котла;  $a_{\Psi}$ ,  $b_{\Psi}$  - коэффициенты аппроксима-

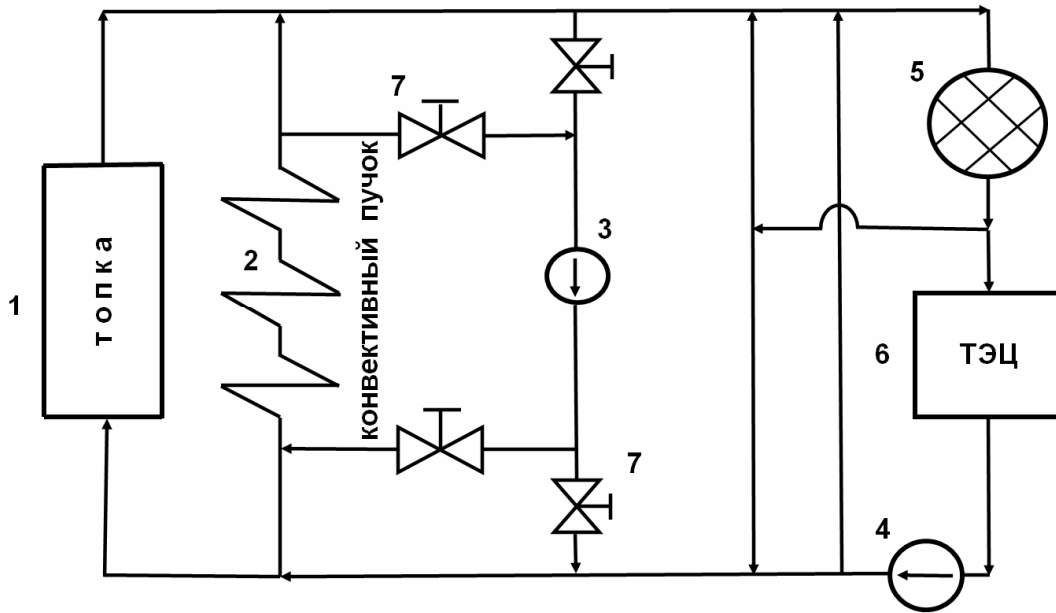


Рис. 6.7.(ИсКСПх2). Модернизация схемы питания котла типа КВГМ. 1, 2 - поверхности нагрева котла, размещённые в топке (т) и газоходе (г); 3, 4 - насосы рециркуляции и сетевой; 5, 6 - потребитель и ТЭЦ; 7 - регулирующие клапана.

последние в результате обработки опытных данных [73] приведены в таблице 6.1 для котлов ПТВМ-100 и КВГМ-100 при сжигании газа (г) и мазута (м). В частности, поверхности нагрева на котлах типа ПТВМ-100 разделяются на три части: малые (м)  $\Psi_{\Psi} = \Psi_m$  и большие (б)  $\Psi_{\Psi} = \Psi_b$  поверхности экранов на стенах топки;  $\Psi_{\Psi} = \Psi_{кп}$  - поверхности конвективных пучков (кп). В котлах типа КВГМ-100 рассматриваются пять расчётных поверхностей нагрева: поверхности фронтального (ф), боковых (б) и заднего (з) экранов топки, т. е.  $\Psi_{\Psi} = \Psi_f$ ,  $\Psi_{\Psi} = \Psi_b$ ,  $\Psi_{\Psi} = \Psi_z$ ; поверхности конвективных пучков (кп) и заднего экрана в газоходе (г), т. е.  $\Psi_{\Psi} = \Psi_{кп}$ ,  $\Psi_{\Psi} = \Psi_g$ .

Эффективность рассмотренных вариантов модернизации котлов в отношении их коррозионной стойкости можно оценить по температурному уровню воды  $t_{\text{вых}}$  в поверхностях нагрева, расположенных в зоне уходящих газов. Значения этих величин определяются на основании приведенных формул (6.4) – (6.7).

Примерные значения температур воды  $t_{\text{вых1}}$  и  $t_{\text{вых2}}$  в коррозионно-опасных зонах котлов ПТВМ-100 и ПТВМ-50 сведены в таблицы 6.2 и 6.3.

Здесь в порядке сравнения рассмотрены разные варианты схем циркуляции воды в котлах (рис. 6.2 – 6.7) при их 100% -ных нагрузках и конкретных значениях температур на входе  $t_{\text{вх}}$  и выходе  $t_{\text{вых}}$ . Из приведенных данных следует, что ожидаемая температура металла труб ( $t_{\text{вых1,2}}$ ) в зоне уходящих газов в случае реализации вариантов предлагаемой модернизации существенно выше по сравнению с вариантами традиционной конструкции. Чем выше значения  $t_{\text{вых1}}$  и  $t_{\text{вых2}}$ , тем больше следует ожидать проявление коррозионной стойкости соответствующих поверхностей



Таблица 6.1. Значения коэффициентов аппроксимации и функций  $\Psi_{\Psi}$ .

Тип котла	ПТВМ-100						КВГМ-100	
	$\Psi_M$		$\Psi_{\phi}$		$\Psi_{кп}$		$\Psi_{\phi}$	
Топливо	Г	М	Г	М	Г	М	Г	М
$a_{\Psi}$	-0,189	-0,046	-0,226	-0,054	0,415	0,10	-0,151	-0,050
$b_{\Psi}$	0,234	0,109	0,281	0,131	-0,015	0,260	0,20	0,110

Таблицы 6.1. Окончание.

Тип котла	КВГМ-100							
	$\Psi_{\phi}$		$\Psi_3$		$\Psi_{кп}$		$\Psi_{\Gamma}$	
Топливо	Г	М	Г	М	Г	М	Г	М
$a_{\Psi}$	-0,277	0,05	-0,302	-0,1	0,69	0,075	0,04	0,025
$b_{\Psi}$	0,48	0,2	0,4	0,22	-0,063	0,475	-0,017	-0,005

нагрева. Вместе с тем значения температур  $t_{\text{вух1}}$  и  $t_{\text{вух2}}$  позволяют судить о величине резерва по снижению температурного уровня воды в этих поверхностях, что позволяет осуществлять дополнительный ввод воды в пропромежуточный тракт котла и этим самым повышать его производительность.

Таблица 6.2. Значения температур воды  $t_{\text{вух1}}$  и  $t_{\text{вух2}}$  в котлах типа ПТВМ-100, 50. Топливо – мазут

Варианты схем циркуляции воды	Схема циркул.	$t_{\text{вх}}$	$t_{\text{вых}}$	$t_{\text{вух1}}$	$t_{\text{вух2}}$
Традиционная схема, рис. 6.2а	2-х	104	150	111,08	-
Схема Союзтехэнерго, рис. 6.2б	2-х	104	150	133,44	-
Рекомендуется, Рис. 6.4а	2-х	104	150	148,71	-
Рекомендуется, Рис. 6.4б	2-х	104	150	150,0	-
Традиционная схема, Рис.6.3а	4-х	70	150	103,84	116,16
Схема Союзтехэнерго, Рис. 6.3б	4-х	70	150	115,04	135,6
Рекомендуется, Рис. 6.5б	4-х	70	150	118,96	148,88
Рекомендуется, Рис. 6.5а	4-х	70	150	150,0	150,0

Таблица 6.3. Значения температур воды  $t_{\text{вух1}}$  и  $t_{\text{вух2}}$  в котлах КВГМ-100. Топливо – мазут

Варианты схем циркуляции воды	Схема циркуляции	$t_{\text{вх}}$		$t_{\text{вых}}$		$t_{\text{вух1}}$	$t_{\text{вух2}}$
		Т	Г	Т	Г		
Традиционная схема циркуляции	2-х	110	110	144,4	155,6	110	155,6
Рекомендуется, рис.6.7 при традиционной схеме циркуляции	2-х	70	110	104,4	155,6	110	155,6
Традиционная схема циркуляции	4-х	70	104,4	104,4	155,6	104,4	155,6
Рекомендуется, рис.6.6	4-х	70	104,4	104,4	150,0	130	150

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

Опыт эксплуатации показывает, что ряд котлов традиционной конструкции имеют существенные недостатки в плане коррозионной стойкости отдельных элементов поверхностей нагрева и оптимизации их тепловых и гидравлических разверок. В данном разделе рассмотрены и обоснованы конкретные варианты модернизации схем циркуляции котлов типа ПТВМ и КВГМ в целях повышения производительности и надёжности их работы. В частности, по возможности рекомендуется повсеместная замена движения воды между коллекторами по схеме «Z» на схему «П». Кроме того, при разработке вариантов модернизации котлов и создания их новых конструкций следует иметь в виду одну существенную особенность их конвективных пучков, о которой уже отмечалось выше в разделе 5.2, т. е. практическое постоянство тепловосприятия независимо от прямо- или противоточной компоновки их относительно потоков дымовых газов. Учёт этого факта способствует отысканию наиболее рациональных вариантов циркуляции воды в конвективных пучках, расположенных в зоне уходящих газов. На основании изложенных материалов следует, что:

1. Увеличить коррозионную стойкость котла, не снижая его экономичности можно путём:

- организации последовательного подогрева воды сначала в экранах топки, затем в конвективных поверхностях нагрева, расположенных в газоходе;

- перевода режима работы конвективного пучка с противоточного на прямоточный.

2. Повысить надёжность работы котла при резких колебаниях гидравлического режима можно путём:

- исключения нисходящих потоков воды в экранных трубах:
- исключения подачи и отвода воды через коллектора, соединяющие экранные и конвективные поверхности нагрева по схеме «Z», и замены её на схему «П», способствующую меньшей гидравлической разверке труб.

3. Увеличить производительность котла и защитить от коррозии поверхности нагрева его, расположенные в зоне уходящих газов можно путём:

- Дополнительного ввода в промежуточный тракт котла сетевой воды, как это показано на рис. 6.4, 6.5.

- организации двух независимых потоков воды от насосов рециркуляции (рис. 6.7) при работе котла по 2-х ходовой схеме: один поток направлять в контур, позволяющий выдерживать меньшую температуру воды на входе, другой – в контур, требующий более высокий температурный уровень воды. При этом общая температура воды после смешения на выходе из обоих контуров котла должна соответствовать заданному графику температуры воды в теплосети.

### 6.3. Общий принцип каскадной схемы питания котлов и её эффективность.

В условиях эксплуатации температура воды на выходе из котла, как правило, всегда выше температуры воды в прямой сети. При этом задача по поддержанию заданной (графиком) температуры воды в прямой сети решается путем частичного подмешивания в неё обратной сетевой воды. Необходимый температурный уровень воды на входе в котёл поддерживается с помощью насоса рециркуляции. В сущности, это разновидность так называемой каскадной схемы питания [86, 87] котла с учётом соблюдения необходимых значений температур воды в теплосети. Принцип каскадной схемы – это прежде всего способ передачи тепловой энергии теплоносителем при оптимально-допустимых перепадах температур его на входе и выходе. Схема подогрева воды в котле таким способом и циркуляция её в сети схематично показана на рис. 6.8. В данном случае суммарная поверхность нагрева котла разделена на число секций  $j = 4$ , каждая из которых способна генерировать теплоту  $Q_i = C G_i (t_i^{\text{ВЫХ}} - t_i^{\text{ВХ}})$ .

Соответственно суммарная нагрузка котла равна  $Q_k = C \sum_{i=1}^j G_i (t_i^{\text{ВЫХ}} - t_i^{\text{ВХ}})$ .

В результате решения комплекса системы уравнений тепловых и материальных балансов, отвечающих схеме потоков воды на рис. 6.8, определяем:

- для значений  $i = 2 \div j$

$$G_{i0} = G_i (t_{i-1}^{\text{ВЫХ}} - t_i^{\text{ВХ}}) (t_{i-1}^{\text{ВЫХ}} - t_0)^{-1}, \quad (6.8)$$

- для значений  $i = 1 \div (j - 1)$

$$G_{iK} = G_{i+1} (t_{i+1}^{\text{ВХ}} - t_0) (t_i^{\text{ВЫХ}} - t_0)^{-1}, \quad (6.9)$$

$$G_p = M_2 G_1 (t_1^{BX} - t_0) (M_1 - M_2 t_0)^{-1}, \quad (6.10)$$

$$G_{ic} = G_i - G_{ik}, \quad (6.11)$$

где

$$M_1 = \sum_{i=1}^{j-1} (G_i - G_{ik}) t_i^{BYX} + G_j t_j^{BYX},$$

$$M_2 = \sum_{i=1}^{j-1} (G_i - G_{ik}) + G_j.$$

Тогда расчётная формула (6.10) принимает вид:

$$G_p = \frac{G_1 (t_1^{BX} - t_0) \left\{ \sum_{i=1}^j G_i - \sum_{i=1}^{j-1} [G_{i+1} (t_{i+1}^{BX} - t_0) (t_i^{BYX} - t_0)^{-1}] \right\}}{\sum_{i=1}^{j-1} [G_i (t_i^{BYX} - t_0) - G_{i+1} (t_{i+1}^{BX} - t_0)] + G_j (t_j^{BYX} - t_0)}. \quad (6.12)$$

Соответственно

$$G_{np} = M_2 - G_p = \sum_{i=1}^{j-1} (G_i - G_{ik}) + G_j - G_p, \quad (6.13)$$

$$G_{po} = G_c + G_p - G_1 - \sum_{i=2}^j G_{io}, \quad (6.14)$$

$$t_{np} = \left[ G_1 t_1^{BX} - (G_c - \sum_{i=2}^j G_{io} - G_{po}) t_0 \right] G_p^{-1}. \quad (6.15)$$

В случае полного равенства тепловых и гидравлических режимов работы всех секций ( $j = \sum i$ ) котла с КСП, т. е. при  $G_i = G_k = \text{const}$ ,  $t_i^{BX} = t_{i-1}^{BX} = t_{i+1}^{BX} = t_j^{BX} = t_1^{BX} = t^{BX} = \text{const}$ ,  $t_i^{BYX} = t_{i-1}^{BYX} = t_{i+1}^{BYX} = t_j^{BYX} = t_1^{BYX} = t^{BYX} = \text{const}$ , формулы (6.8) – (6.15) соответственно упрощаются:

$$G_{io} = G_{ic} = G_k (t^{BYX} - t^{BX}) (t^{BYX} - t_0)^{-1}, \quad (6.16)$$

$$G_{ik} = G_p = G_k (t^{BX} - t_0) (t^{BYX} - t_0)^{-1}, \quad (6.17)$$

$$G_{np} = j G_k (t^{BYX} - t^{BX}) (t^{BYX} - t_0)^{-1}, \quad (6.18)$$

$$G_{po} = G_c + G_k \left\{ [t^{BYX} - j(t^{BYX} - t^{BX}) - t_0] (t^{BYX} - t_0)^{-1} - 1 \right\}, \quad (6.19)$$

$$t_{np} = t^{BYX} \geq t_c. \quad (6.20)$$

На рис. 6.8а и 6.8б в порядке примеров даны выкопировки из рабочих листов программного средства «ПрКСП», позволяющего исследовать принципиальные возможности котла с организацией КСП.

Таким образом, основной особенностью каскадной схемы питания (КСП) водогрейного котла является возможность снижения среднего температурного уровня циркулирующей воды в поверхностях нагрева со всеми вытекающими из этого последствиями. В частности, более низкий температурный уровень воды в котле позволяет иметь некоторый запас в отношении предельных норм качества котловой воды [88], что очень важно при частом

попадании в теплосеть сырой воды. Кроме того, открываются возможности снижения температуры уходящих газов путем уменьшения температуры воды на выходе из котла.

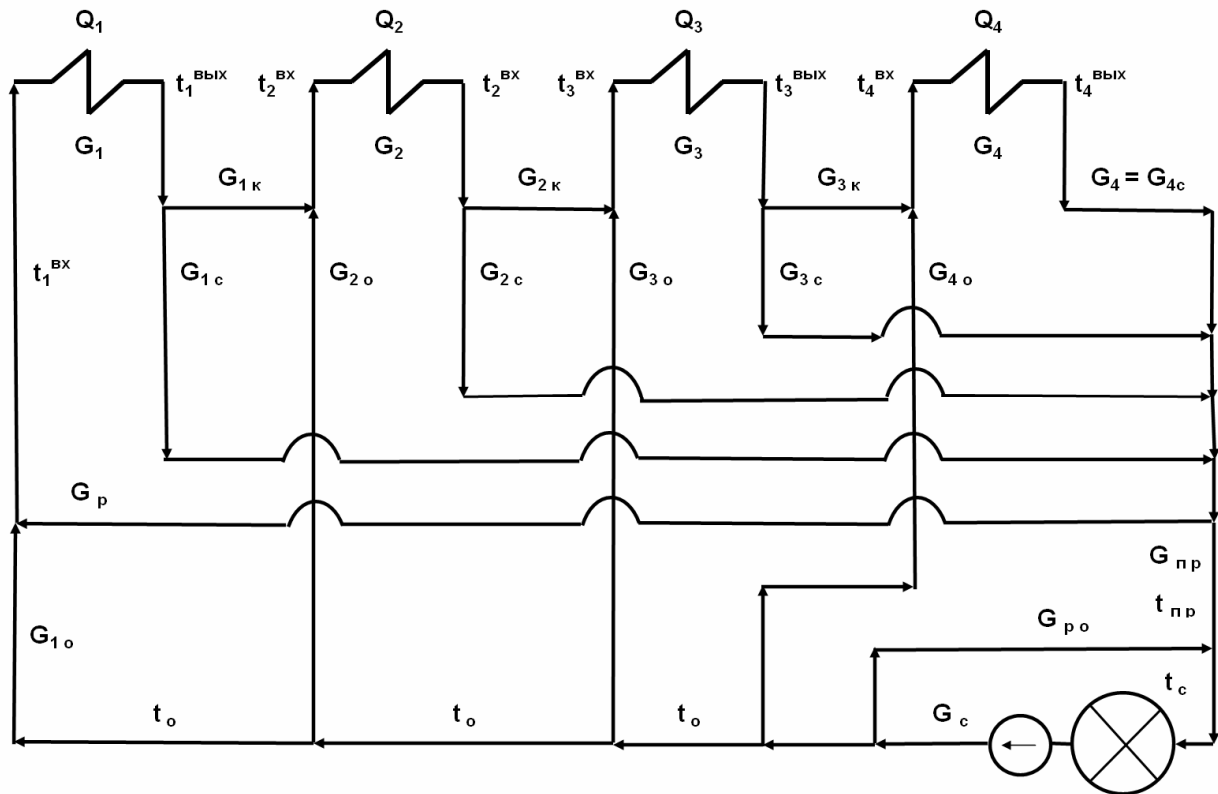


Рис. 6.8. (ПрКСП). Общий принцип организации каскадной 4-х секционной ( $j = 4$ ) схемы питания (КСП) котла.  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, (Q_i)$  и  $G_1, G_2, G_3, G_4, (G_i)$  - нагрузки и циркуляция воды по секциям  $i = 1 \div j$  котла;  $G_{1o}, G_{2o}, G_{3o}, G_{4o}, (G_{io})$  - подача обратной сетевой воды с систему питания котла;  $G_{1k}, G_{2k}, G_{3k}, (G_{ik})$  - транзитные потоки воды между секциями котла;  $G_{1c}, G_{2c}, G_{3c}, G_{4c}, (G_{ic})$  - потоки воды, поступающей из каждой секции в общий выходной коллектор котла;  $G_{пр}$  и  $t_{пр}$  расход и температура воды на выходе из котельной;  $G_c, t_c$  и  $t_o$  - циркуляция и температура воды, поступающей из каждой секции в общий выходной коллектор котла;  $G_{пр}$  и  $t_{пр}$  расход и температура воды на выходе из котельной;  $G_c, t_c$  и  $t_o$  - циркуляция и температура прямой и обратной воды в теплосети;  $G_p$  и  $G_{po}$  - потоки рециркуляции.

Предлагаемая схема питания [86, 87] может быть использована не только при разработке котлов новой конструкции, но и при модернизации старых. Эффективность КСП можно определить по разности температур воды, циркулирующей в конвективном пучке котла, до и после модернизации:

$$\Delta t_{yx}^{cp} = t_{срк}^{ксп} - t_{срк}^{тр}, \quad (6.21)$$

где

$$t_{срк}^{тр} = 0,5(t_{вхк}^{тр} + t_{выхк}^{тр}), \quad (6.22a)$$

$$t_{срк}^{ксп} = 0,5(t_{вхк}^{ксп} + t_{выхк}^{ксп}). \quad (6.22б)$$

При организации КСП конвективного пучка тепловосприятие его практически не изменится, изменятся только температуры воды на входе и выходе из него, т.е.

$$t_{выхк}^{ксп} - t_{вхк}^{ксп} \approx t_{выхк}^{тр} - t_{вхк}^{тр}. \quad (6.23)$$

Тогда на основании (6.21) – (6.23) определяем:

$$\Delta t_{yx}^{cp} = t_{вхк}^{ксп} - t_{вхк}^{тр} \approx t_{выхк}^{ксп} - t_{выхк}^{тр} = \Delta t_{в}. \quad (6.24)$$

Общее выражение по расчёту экономии топлива (в %) за счет организации КСП запишем так:

$$\frac{\Delta B_p \cdot 100}{B_p^{тр}} = - \frac{\Delta \eta_{бр} \cdot 100}{\eta_{бр}^{ксп}} = - \frac{\Delta \eta_{бр} \cdot 100}{\eta_{бр}^{тр} + \Delta \eta_{бр}}, \quad (6.25)$$

где  $\Delta B_p = B_p^{ксп} - B_p^{тр}$ ,  $\Delta \eta_{бр} = \eta_{бр}^{ксп} - \eta_{бр}^{тр}$ ,  $B_p^{тр}$ ,  $\eta_{бр}^{тр}$  и  $B_p^{ксп}$ ,  $\eta_{бр}^{ксп}$  – расходы топлива и КПД брутто котла до и после модернизации.

**ПрКСПа** Исследование общего принципа режимов работы котла с j-и секционной каскадной схемой питания (КСП) в сравнении с традиционным вариантом.

Обозн.		$Q_k = Q_c$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$G_c$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	
j	Разм.	Гкал/ч	МВт	Гкал/ч	Гкал/ч	Гкал/ч	Гкал/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч
1	Трад.	90	105	90	0	0	0	1800	1500	0	0	0
2	Вар. 1	90	105	45,0	45,0	0	0	1800	1500	1500	0	0
	Вар. 2	90	105	45,0	45,0	0	0	1800	1500	1500	0	0
3	Вар. 1	90	105	30,0	30,0	30,0	0	1800	1500	1500	1500	0
	Вар. 2	90	105	30,0	30,0	30,0	0	1800	1500	1500	1500	0
4	Вар. 1	90	105	22,5	22,5	22,5	22,5	1800	1500	1500	1500	1500
	Вар. 2	90	105	22,5	22,5	22,5	22,5	1800	1500	1500	1500	1500
Обозн.		$t_c$	$t_o$	$t_1^{вх}$	$t_1^{вых}$	$t_2^{вх}$	$t_2^{вых}$	$t_3^{вх}$	$t_3^{вых}$	$t_4^{вх}$	$t_4^{вых}$	$G_{10}$
j	Разм.	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	т/ч
1	Трад.	90	40	70	130	0	0	0	0	0	0	1000
2	Вар. 1	90	55	70	91	70	91	0	0	0	0	875
	Вар. 2	90	55	70	91	70	91	0	0	0	0	875
3	Вар. 1	90	38	70	91	70	91	70	91	0	0	589
	Вар. 2	90	38	70	91	70	91	70	91	0	0	589
4	Вар. 1	90	20	70	91	70	91	70	91	70	91	444
	Вар. 2	90	20	70	91	70	91	70	91	70	91	444
Обозн.		$G_{20}$	$G_{30}$	$G_{40}$	$G_{1к}$	$G_{2к}$	$G_{3к}$	$M_1$	$M_2$	$G_{1с}$	$G_{2с}$	$G_{3с}$
j	Разм.	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т°С/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч
1	Трад.	0	0	0	0	0	0	2E+05	1500	1500	0	0
2	Вар. 1	875	0	0	625	0	0	2E+05	2375	875	1500	0
	Вар. 2	875	0	0	625	0	0	2E+05	2375	875	1500	0
3	Вар. 1	589	589	0	911	911	0	2E+05	2678	589	589	1500
	Вар. 2	589	589	0	911	911	0	2E+05	2678	589	589	1500
4	Вар. 1	444	444	444	1056	1056	1056	3E+05	2831	444	444	444
	Вар. 2	444	444	444	1056	1056	1056	3E+05	2831	444	444	444
Обозн.		$G_{пр}$	$G_p$	$G_{po}$	$t_{пр}$	$t_{cp}^{вх}$	$t_{cp}^{вых}$	$t_{cp}^{кот}$	$\Delta t_{cp}^{кот}$			
j	Разм.	т/ч	т/ч	т/ч	°С	°С	°С	°С	°С			
1	Трад.	1000	500	800	130	70	130	100	-			
2	Вар. 1	1750	625	50	91	70	91	80,5	19,5			
	Вар. 2	1750	625	50	91	70	91	80,5	19,5			
3	Вар. 1	1766	911	34	91	70	91	80,5	19,5			
	Вар. 2	1766	911	34	91	70	91	80,5	19,5			
4	Вар. 1	1775	1056	25	91	70	91	80,5	19,5			
	Вар. 2	1775	1056	25	91	70	91	80,5	19,5			

Рис. 6.8а. Рабочий лист из программного средства по исследованию принципиальных возможностей КСП котла в соответствии со схемой циркуляции, представленной на рис. 6.8.

ПрКСПб		Влияние числа ( $i = 1 \div j$ ) равнозначных секций котла с КСП на его теплотехнические характеристики в сравнении с традиционным вариантом.										
Обозн.	j	$G_i = G_k$	$t^{BX}$	$t^{ВЫХ}$	$G_c$	$t_c$	$t_o$	$Q_k = Q_c$		$Q_i$	$G_{p.o}$	$G_{i.k} = G_p$
Разм.	-	т/ч	°С	°С	т/ч	°С	°С	Гкал/ч	МВт	Гкал/ч	т/ч	т/ч
Трад.	1	1500	70	130	1800	90	40,0	90	105	90,0	800	500
КСП	2	1500	70	91	1800	90	55,0	90	105	45,0	50	625
КСП	3	1500	70	91	1800	90	37,5	90	105	30,0	34	911
КСП	4	1500	70	91	1800	90	20,0	90	105	22,5	25	1056
Обозн.	j	$G_{i.o} = G_{i.c}$		$G_{np} = j G_{i.o} = j G_{i.c}$		$t_{np} = t^{ВЫХ}$		$t_{cp}^{BX}$	$t_{cp}^{ВЫХ}$	$t_{cp}^{КОТ}$	$\Delta t_{cp}^{КОТ}$	
Разм.	-	т/ч		т/ч		°С		°С	°С	°С	°С	
Трад.	1	1000		1000		130		70	130	100	-	
КСП	2	875		1750		91		70	91	80,5	19,5	
КСП	3	589		1766		91		70	91	80,5	19,5	
КСП	4	444		1775		91		70	91	80,5	19,5	

Рис. 6.8б. Рабочий лист программного средства по исследованию принципиальных возможностей КСП котла в соответствии со схемой циркуляции на рис. 6.8.

Общее выражение по расчёту экономии топлива (в %) за счет организации КСП запишем так:

$$\frac{\Delta B_p \cdot 100}{B_p^{тр}} = - \frac{\Delta \eta_{бр} \cdot 100}{\eta_{бр}^{ксп}} = - \frac{\Delta \eta_{бр} \cdot 100}{\eta_{бр}^{тр} + \Delta \eta_{бр}}, \quad (6.25)$$

где  $\Delta B_p = B_p^{ксп} - B_p^{тр}$ ,  $\Delta \eta_{бр} = \eta_{бр}^{ксп} - \eta_{бр}^{тр}$ ,  $B_p^{тр}$ ,  $\eta_{бр}^{тр}$  и  $B_p^{ксп}$ ,  $\eta_{бр}^{ксп}$  – расходы топлива и КПД брутто котла до и после модернизации.

Величину изменения КПД брутто котла за счет модернизации определим с помощью известного коэффициента  $K_{yx} = \partial \eta_{бр} / \partial t_{yx}$ , зависящего от марки сжигаемого топлива:

$$\Delta \eta_{бр} = K_{yx} \Delta t_{yx}^{cp} = K_{yx} \Delta t_b; \quad (6.26)$$

при сжигании газа  $K_{yx} = -0,05 \%/K$ , мазута –  $K_{yx} = -0,047 \%/K$ .

Задача выявления оптимальных уровней подогрева воды в экранах топки и конвективных поверхностях нагрева котла в связи с организацией КСП является сравнительно новой и актуальной. КСП позволяет организовать разнотемпературный режим работы поверхностей нагрева до и после ввода холодного потока  $G_{i.o}$ . В частности, этот режим следует организовать так, чтобы более высокий температурный уровень располагался в поверхностях нагрева топки и наоборот, более низкий – в конвективных поверхностях нагрева. Причём, соотношение между температурными уровнями в экранных и конвективных поверхностях нагрева должно быть таково, чтобы конечная температура воды на выходе из такого модернизированного котла отвечала необходимым требованиям в теплосети.

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

На основании изложенного материала следует, что КСП котла сводится, по сути дела, к разделению его поверхностей на отдельные секции, связанные между собой по воде и обогреваемые единым теплоносителем. Очевидно, что принцип каскадной схемы и соответствующий эффект от её организации можно получить при последовательном соединении водяных трактов (играющих роль секций) нескольких котлов в

котельной. В данном случае каждая секция имеет свой автономный источник первичного теплоносителя.

Путём организации способа КСП открываются широкие возможности оптимизации и стабилизации температуры уходящих газов на выходе из котлов традиционных конструкций после их соответствующей модернизации, а также при разработке котлов новой конструкции.

#### **6.4. Примерные варианты модернизации водогрейных котлов путём организации каскадной схемы питания.**

Из опыта эксплуатации известно, что в ряде случаев температура воды  $t_{\text{вых}}$  на выходе из водогрейного котла выше температуры воды в прямой теплосети  $t_c$ , установленной графиком. Это вызвано, прежде всего, составом работающего оборудования, величиной нагрузки котла и соотношением массовых потоков теплоносителей (воды), циркулирующих в котле и в теплосети [70]. В сравнении с традиционной схемой питания организация КСП позволяет снизить разрыв между температурами  $\Delta t = t_{\text{вых}} - t_c$  до минимума, а в ряде случаев и до нуля.

На рис. 6.9 – 6.13 показаны примерные варианты организации каскадной схемы питания на котлах типа ПТВМ-50, 100 и КВГМ-100. На рис. 6.14 показана принципиальная схема котельной, состоящей из трех любых модернизированных котлов, указанных на рис. 6.9 – 6.13.

Для каждого из рекомендуемых (рис. 6.9 – 6.13) вариантов модернизации котлов разработаны программные средства (ПрКСП, ВКП1, ВКО1, СтКСП и др), позволяющие выполнять соответствующие расчёты в процессе проектирования и сопоставлять ожидаемый эффект с традиционным вариантом исполнения. Выкопировки из рабочих листов упомянутых программных средств приведены на рис. 6.9ф – 6.13ф. В процессе расчётов определяются значения охлаждающих потоков  $G_{\text{ок}}$  обратной сетевой воды с температурой  $t_o$  по отношению к суммарному расходу воды на котел  $G_{\text{кт}}$ , т.е.  $g_{\text{ок}} = G_{\text{ок}}/G_{\text{кт}} = (t_{\text{T2}} - t_{\text{к1}})/(t_{\text{T2}} - t_o)$ , где (рис.6.14)  $t_{\text{T2}}$ ,  $t_{\text{к1}}$  - температуры воды на выходе из 1-ой секции котла и на входе во вторую.

Среднеинтегральное значение температуры воды на выходе из котла в целом согласно обозначениям на рис. 6.9 – 6.13 равно:

$$t_{\text{кот}}^{\text{вых}} = \frac{g_o^r t_{\text{T2}} + (1 - g_o^r + g_o^x) t_{\text{к2, м. кт}}}{1 + g_o^x}, \quad (6.27)$$

где (рис. 6.14, 6.9 – 6.13)  $t_{\text{к2, м. кт}}$  - температура воды на выходе из второй секции котла.

Примерные значения температур  $t_{\text{T1}}$ ,  $t_{\text{T2}}$ ,  $t_{\text{к1}}$ ,  $t_{\text{к2}}$  и средние значения температур воды  $t_{\text{срк}}$  в зоне конвективного пучка при 100%-х нагрузках котлов сведены в таблицу 6.4. Здесь же указаны значения температур воды  $t_{\text{кот}}^{\text{ср}}$  за котлом и изменения КПД брутто котла  $\Delta \eta_{\text{бр}}$  за счет температуры уходя-



щих газов при организации КСП. Расчеты выполнены по формулам (6.21) – (6.27) при  $K_{yx} = -0,05\%/K$ , а также с учетом зависимостей (6.6), (6.7).

Как уже отмечалось, циркуляцию воды в котле с КСП целесообразно организовать так, чтобы часть секций представляла собой поверхности, расположенные в топке, а другая – в газоходе. В секциях, расположенных в газоходе, температурный уровень воды устанавливается ниже, а в секциях,

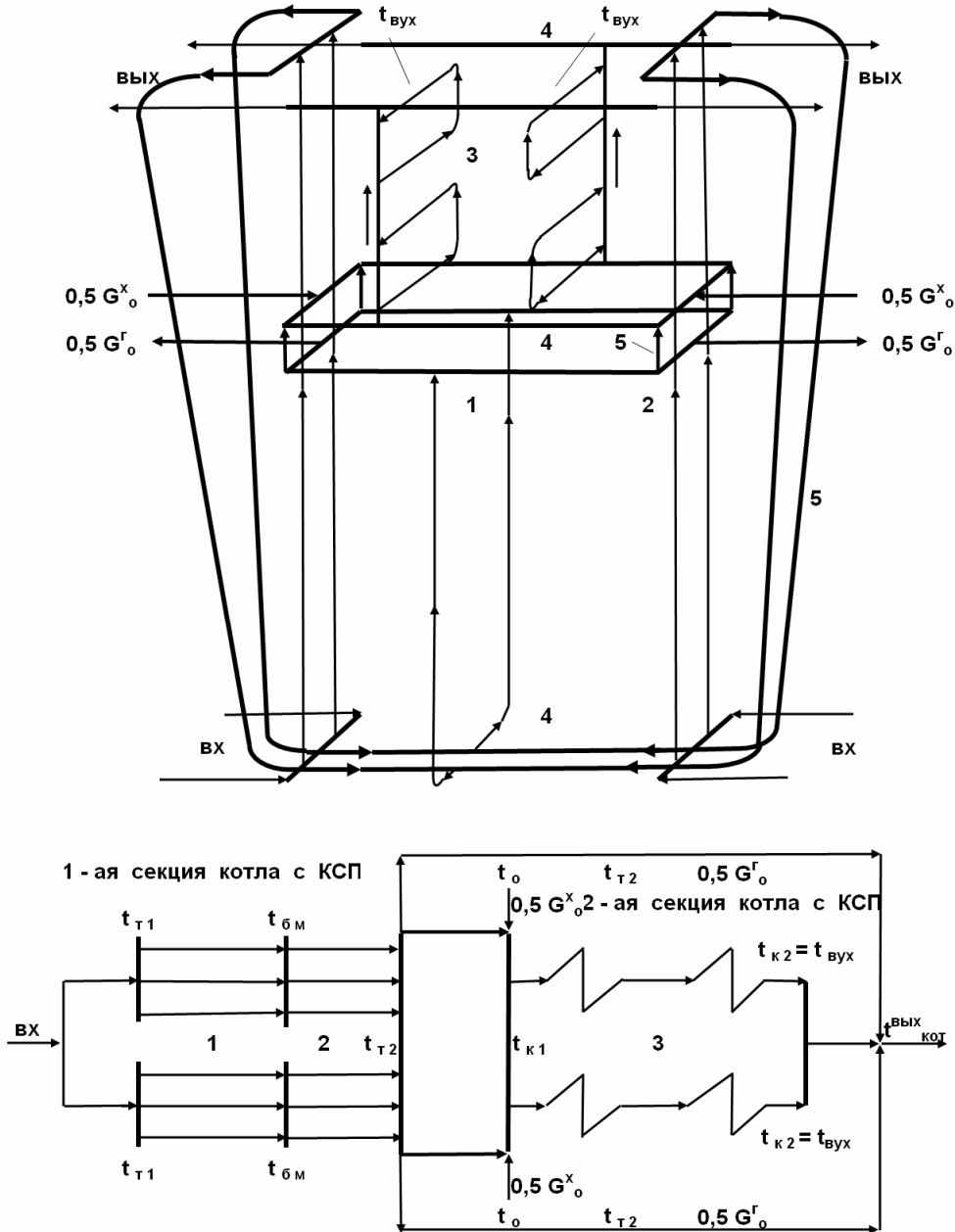


Рис. 6.9.(МонКСП). Вариант модернизации контуров циркуляции водогрейных котлов типа ПТВМ-50, 100 с модернизированной 2-х ходовой и 2-х секционной каскадной схемой питания (КСП).  $t_{T1}$ ,  $t_{6M}$ ,  $t_{T2}$ ,  $t_{K1}$ ,  $t_{K2} = t_{ВУХ}$  - значения температур воды на переходных границах по водяному тракту котла.  $t_o$  и  $t_{ВУХ}$  - температура обратной сетевой воды из теплосети и температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов;  $t_{ВУХ\text{ кот}}$  - температура воды на выходе из котла.  $G_o^r$  и  $G_o^x$  - промежуточный отбор горячей и ввод холодной обратной сетевой воды в тракт котла. 1, 2 - экранные трубы; 3 - конвективный пучок; 4 - коллекторы; 5 - перепускные трубы.

Рис.6.2а/6.9 Исследование и сопоставление с традиционным вариантом температурных режимов работы водогрейного котла ПТВМ-100 с модернизированной 2-х ходовой и 2-х секционной каскадной схемой питания (КСП)

1. Традиционная схема питания котла (рис. 6.2а)

Обозн.	$Q_H$	$Q_{KT}$	$G$	$t_{T1}$	$\Psi_B$	$\Psi_{KP}$	$\Psi_M$	$t_{BKП}$	$t_{KPM}$	$t_{KOT}^{BЫX}$	$t_{KП}^{CP}$
Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	МВт	т/ч	°С	-	-	°С	°С	°С	°С
Газ	90	100	116,3	2500	80	0,030	0,446	0,024	82,39	118,1	120,0
Мазут	90	100	116,3	2500	104	0,071	0,371	0,058	109,7	139,4	144,0

2. Вариант каскадной схемы питания котла (КСП, рис. 5.9).

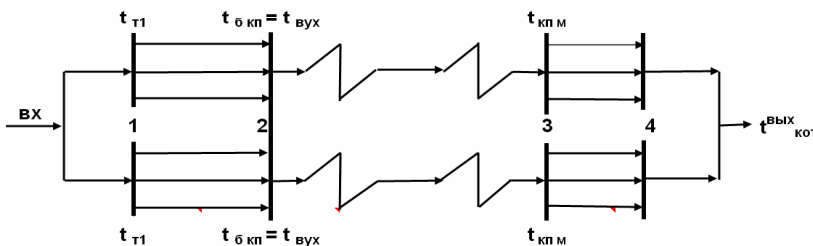
Режи-мы	Обозн.	$Q_H$	$Q_{KT}$	$t_o$	$t_{T1}$	$G_1$	$G_2$	$g_o^r$	$g_o^x$	$G_o^r$	$G_o^x$
Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	МВт	°С	°С	т/ч	т/ч	-	-	т/ч	т/ч
1	Газ	90	100	116,3	40	80	2500	2500	0,2	0,2	500
	Мазут	90	100	116,3	40	104	2500	2500	0,2	0,2	500
2	Газ	90	100	116,3	40	70	2500	2500	0,2	0,2	500
	Мазут	90	100	116,3	40	104	2500	2500	0,2	0,2	500
3	Газ	90	100	116,3	40	70	2500	2500	0,2	0,2	500
	Мазут	90	100	116,3	40	104	2500	2500	0,2	0,2	500
4	Газ	90	100	116,3	40	70	2500	2500	0,2	0,2	500
	Мазут	90	100	116,3	40	104	2500	2500	0,2	0,2	500

2. Вариант каскадной схемы питания котла (КСП, рис. 5.9). Продолжение.

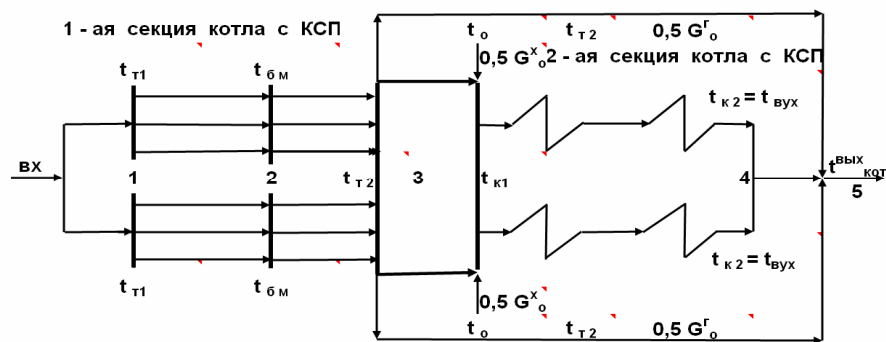
$C =$	4187	$\Psi_B$	$\Psi_M$	$\Psi_{KP}$	$t_{BM}$	$t_{T2}$	$t_{K1}$	$t_{K2}$	$t_{KOT}^{BЫX}$	$t_{KП}^{CP}$	$\Delta t_{УХ}$	$\Delta \rho_{BP}$
Дж/(кг°К)			-	-	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	%
1	Газ	0,030	0,024	0,446	82,4	84,3	75,4	111,1	106,7	93,3	-6,9	0,3
	Мазут	0,071	0,058	0,371	109,7	114,3	99,4	129,1	126,7	114,3	-10,2	0,5
2	Газ	0,030	0,024	0,446	72,4	74,3	67,4	103,1	98,3	85,3	-14,9	0,7
	Мазут	0,071	0,058	0,371	109,7	114,3	99,4	129,1	126,7	114,3	-10,2	0,5
3	Газ	0,030	0,024	0,446	72,4	74,3	67,4	103,1	98,3	85,3	-14,9	0,7
	Мазут	0,071	0,058	0,371	109,7	114,3	99,4	129,1	126,7	114,3	-10,2	0,5
4	Газ	0,030	0,024	0,446	72,4	74,3	67,4	103,1	98,3	85,3	-14,9	0,7
	Мазут	0,071	0,058	0,371	109,7	114,3	99,4	129,1	126,7	114,3	-10,2	0,5

Графическое отображение подогрева воды по водяным трактам котла.

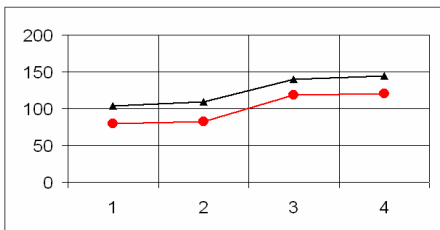
1. Традиционная схема питания котла (рис. 6.2а)



2. Вариант каскадной схемы питания котла (КСП, рис. 6.9).



1. Трад. Сх. питания котла (рис. 6.2а)



2. Вариант КСП котла (рис. 6.9).

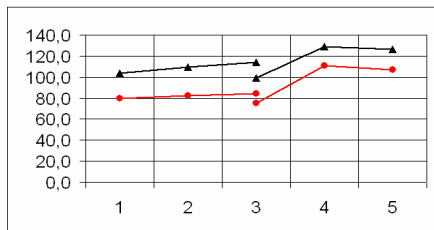


Рис. 6.9ф.(МонКСП). Исследование режимов работы модернизированного котла в сравнении с его традиционной конструкцией.

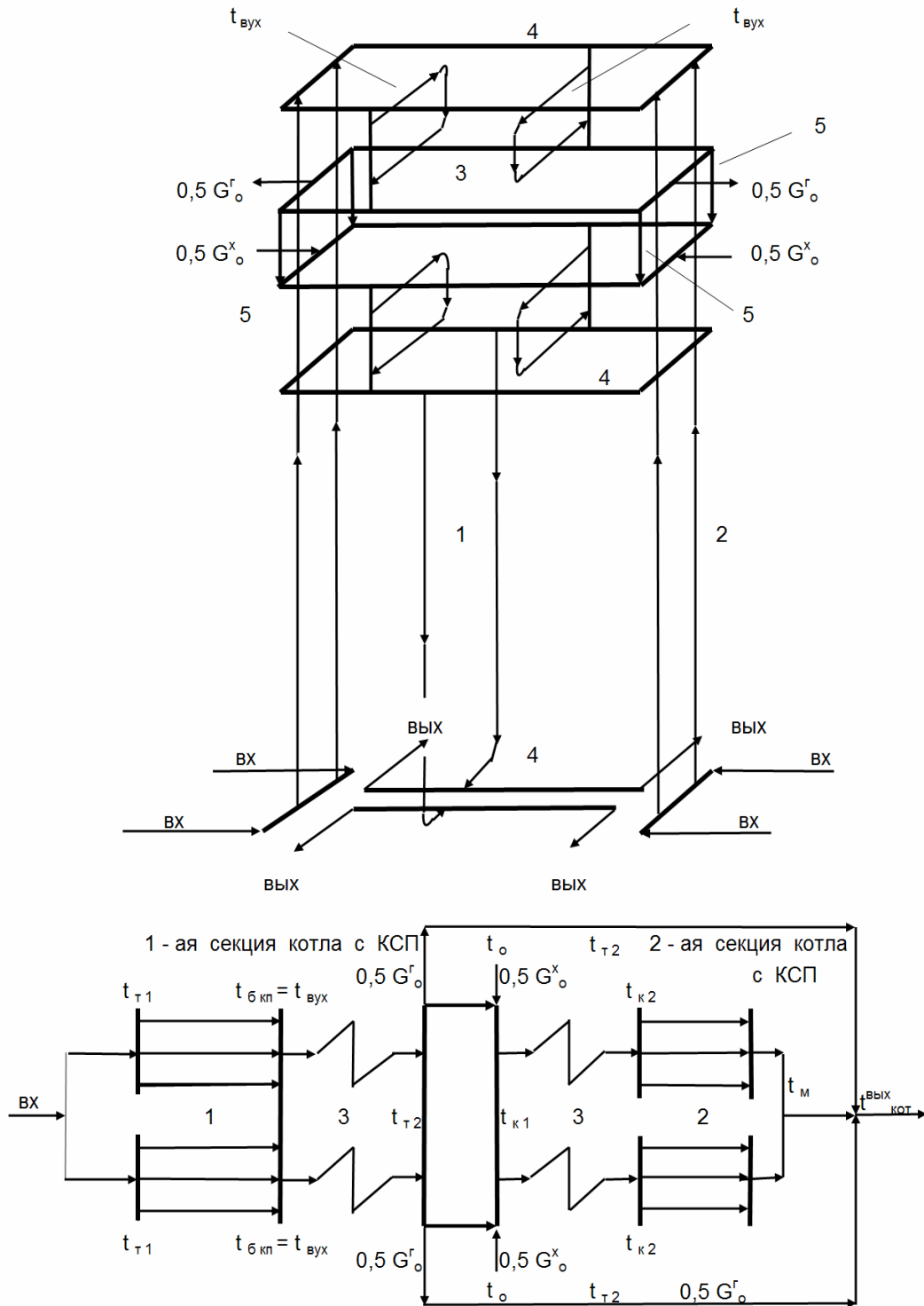


Рис. 6.10.(МонКСП). Вариант модернизации контуров циркуляции водогрейных котлов типа ПТВМ-50, 100 с модернизированной 2-х ходовой и 2-х секционной каскадной схемой питания (КСП).  $t_{T1}$ ,  $t_{бкп} = t_{вух}$ ,  $t_{T2}$ ,  $t_{к1}$ ,  $t_{к2}$ ,  $t_{м}$  - значения температур воды на переходных границах по водяному тракту котла.  $t_{о}$  и  $t_{вух}$  - температура обратной сетевой воды из теплосети и температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов;  $t_{вух кот}$  - температура воды на выходе из котла.  $G_o^r$  и  $G_o^x$  - промежуточный отбор горячей и ввод холодной обратной сетевой воды в тракт котла. 1, 2 - экранные трубы; 3 - конвективный пучок; 4 - коллекторы; 5 - перепускные трубы.

Рис.6.2а/6.10) Исследование и сопоставление с традиционным вариантом температурных режимов работы водогрейного котла ПТВМ-100 с модернизированной 2-х ходовой и 2-х секционной каскадной схемой питания (КСП)

1. Традиционная схема питания котла (рис. 6.2а)

Обозн.	$Q_H$	$Q_{KT}$	$G$	$t_{T1}$	$\Psi_6$	$\Psi_{KII}$	$\Psi_M$	$t_{6\text{кп}}$	$t_{кп\text{м}}$	$t_{\text{ВЫХ}}^{\text{КОТ}}$	$t_{\text{КП}}^{\text{СР}}$	
Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	МВт	т/ч	°С	-	-	°С	°С	°С	°С	
Газ	90	100	116,3	2500	70	0,030	0,446	0,024	72,4	108,1	110,0	90,2
Мазут	90	100	116,3	2500	104	0,071	0,371	0,058	109,7	139,4	144,0	124,5

2А. Вариант каскадной схемы питания котла (рис. 6.10)

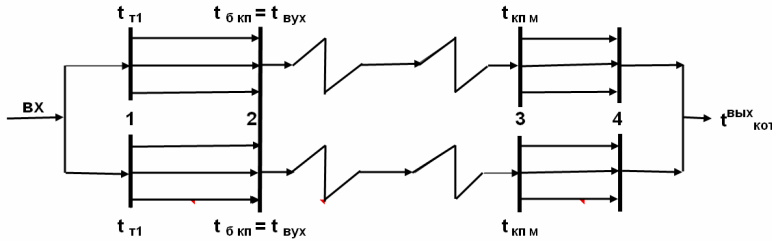
Режи-мы	Обозн.	$Q_H$	$Q_{KT}$	$t_o$	$t_{T1}$	$G_1$	$G_2$	$g_o^r$	$g_o^x$	$G_o^r$	$G_o^x$	$G_{\text{ВЫХ}}^{\text{КОТ}}$	
	Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	МВт	°С	°С	т/ч	т/ч	-	-	т/ч	т/ч	т/ч
1	Газ	90	100	116,3	40	70	2500	2500	0,2	0,2	500	500	3000
	Мазут	90	100	116,3	40	104	2500	2500	0,2	0,2	500	500	3000
2	Газ	90	100	116,3	50	104	2500	2500	0,2	0,2	500	500	3000
	Мазут	90	100	116,3	50	104	2500	2500	0,2	0,2	500	500	3000
3	Газ	90	100	116,3	60	104	2500	2500	0,2	0,2	500	500	3000
	Мазут	90	100	116,3	60	104	2500	2500	0,2	0,2	500	500	3000
4	Газ	90	100	116,3	70	104	2500	2500	0,2	0,2	500	500	3000
	Мазут	90	100	116,3	70	104	2500	2500	0,2	0,2	500	500	3000

2Б. Вариант каскадной схемы питания котла (рис. 6.10)

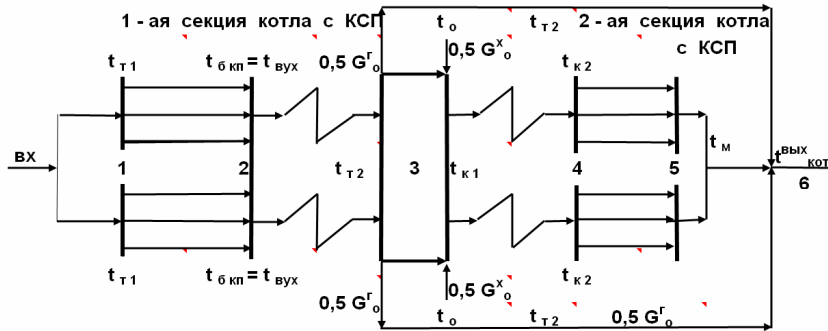
$C =$	4186,8	$\Psi_6$	$\Psi_M$	$\Psi_{KII}$	$t_{6\text{кп}}$	$t_{T2}$	$t_{K1}$	$t_{K2}$	$t_M$	$t_{\text{ВЫХ}}^{\text{КОТ}}$	$t_{\text{КП}}^{\text{СР}}$	$\Delta t_{\text{УХ}}$	$\Delta \eta_{\text{БР}}$
Дж/(кг*К)	-	-	-	-	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	%
1	Газ	0,030	0,024	0,446	72,39	90,2	80,2	98,0	100,0	98,3	85,2	-5,0	0,3
	Мазут	0,071	0,058	0,371	109,7	124,5	107,6	122,5	127,1	126,7	116,1	-8,5	0,4
2	Газ	0,030	0,024	0,446	106,4	124,2	109,4	127,2	129,2	128,3	116,8	26,6	-1,3
	Мазут	0,071	0,058	0,371	109,7	124,5	109,6	124,5	129,1	128,3	117,1	-7,5	0,4
3	Газ	0,030	0,024	0,446	106,4	124,2	111,4	129,2	131,2	130,0	117,8	27,6	-1,4
	Мазут	0,071	0,058	0,371	109,7	124,5	111,6	126,5	131,1	130,0	118,1	-6,5	0,3
4	Газ	0,030	0,024	0,446	106,4	124,2	113,4	131,2	133,2	131,7	118,8	28,6	-1,4
	Мазут	0,071	0,058	0,371	109,7	124,5	113,6	128,5	133,1	131,7	119,1	-5,5	0,3

Графическое отображение подогрева воды по водяным трактам котла.

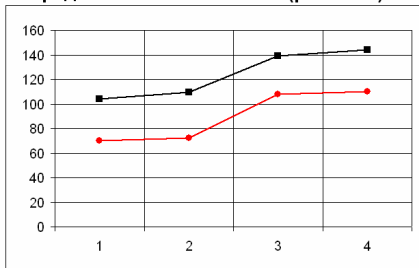
1. Традиционная схема питания котла ПТВМ-100 (рис. 6.2а)



2. Вариант КСП котла ПТВМ-100 (рис. 6.10).



1. Трад. Сх. питания котла (рис. 6.2а)



2. Вариант КСП котла (рис. 6.10).

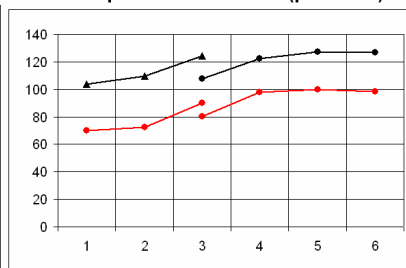


Рис. 6.10ф.(МонКСП). Исследование режимов работы модернизированного котла в сравнении с его традиционной конструкцией.

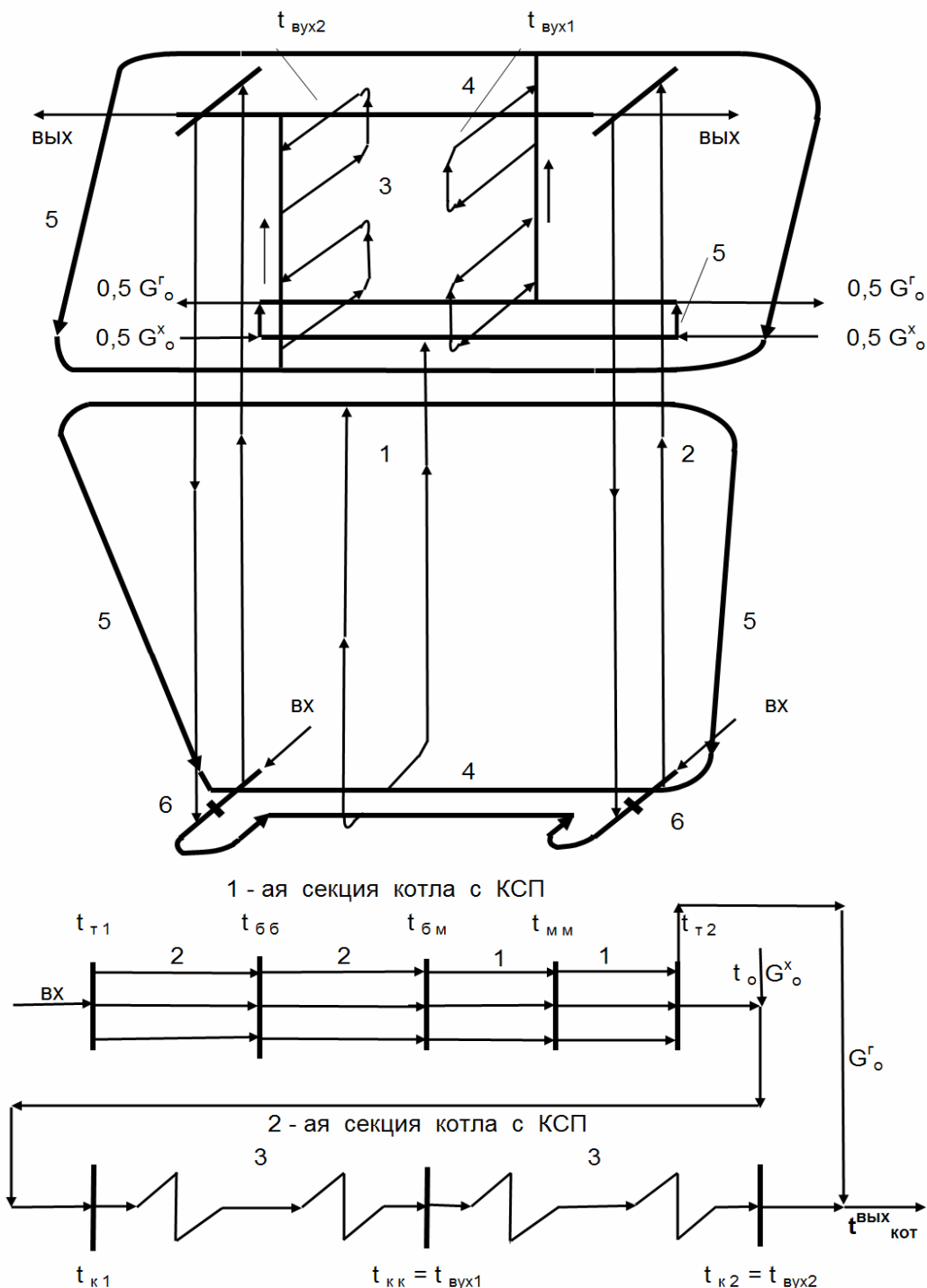


Рис. 6.11.(МонКСП). Вариант модернизации контуров циркуляции водогрейных котлов типа ПТВМ-50, 100 с модернизированной 4-х ходовой и 2-х секционной каскадной схемой

питания (КСП).  $t_{T1}$ ,  $t_{66}$ ,  $t_{6M}$ ,  $t_{MM}$ ,  $t_{T2}$ ,  $t_{K1}$ ,  $t_{KK} = t_{ВУХ1}$ ,  $t_{K2} = t_{ВУХ2}$  - значения температур на переходных границах по водяному тракту котла.  $t_o$  и  $t_{ВУХ1,2}$  - температура обратной сетевой воды из теплосети и температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов;  $t_{ВУХ\text{ кот}}$  - температура воды на выходе из котла.  $G_o^r$  и  $G_o^x$  - промежуточный отбор горячей и ввод холодной обратной сетевой воды в тракт котла. 1, 2 - экранные трубы; 3 - конвективный пучок; 4 - коллекторы; 5 - перепускные трубы; 6 - заглушки.

расположенных в топке – выше. Такую модернизацию можно выполнить и применительно к котлам традиционной конструкции (типа ПТВМ, КВГМ и

др.) с организацией двух секций КСП, как это показано на рис. 6.9 и 6.11 для котлов типа ПТВМ и на рис. 6.13 для котла типа КВГМ. Среднемассовая температура воды после смешения потоков на выходе из обеих секций котла должна соответствовать заданному графику.

Рис.6.3а/6.11

Исследование и сопоставление с традиционным вариантом температурных режимов работы водогрейного котла ПТВМ-100 с модернизированной 4-х ходовой и 2-х секционной каскадной схемой питания (КСП).

1. Традиционная схема питания котла (рис. 6.3а)

Обозн.	Q <sub>н</sub>	Q <sub>кп</sub>	G	t <sub>г1</sub>	Ψ <sub>о</sub>	Ψ <sub>кп</sub>	Ψ <sub>м</sub>	t <sub>мкп</sub>	t <sub>кпб</sub>	t <sub>о</sub>	t <sub>кп</sub>	t <sub>кпм</sub>	t <sub>ввх кот</sub>	t <sub>кп</sub> <sup>ср</sup>
Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	МВт	т/ч	°С	-	-	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С
Газ	90	100	116,3	1250	70	0,030	0,446	0,024	71,9	107,6	110,0	112,4	148,1	150,0
Мазут	90	70	81,41	1250	90	0,089	0,338	0,073	94,1	113,0	118,0	123,0	141,9	146,0

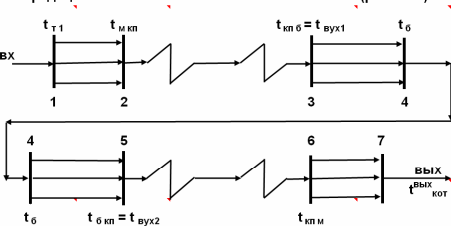
2А. Вариант каскадной схемы питания котла (рис. 6.11)

Режи-мы	Обозн.	Q <sub>н</sub>	Q <sub>кп</sub>	t <sub>о</sub>	t <sub>г1</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	g <sub>о</sub> <sup>г</sup>	g <sub>о</sub> <sup>м</sup>	G <sub>о</sub> <sup>г</sup>	G <sub>о</sub> <sup>м</sup>	G <sub>о</sub> <sup>ввх кот</sup>	Ψ <sub>о</sub>	Ψ <sub>м</sub>	Ψ <sub>кп</sub>	t <sub>о6</sub>	t <sub>о6</sub> <sup>г</sup>	t <sub>о6</sub> <sup>м</sup>	t <sub>т2</sub>	t <sub>к1</sub>	t <sub>кк</sub>	t <sub>к2</sub>	t <sub>ввх кот</sub>	t <sub>кп</sub> <sup>ср</sup>	
	Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	°С	°С	т/ч	т/ч	-	-	т/ч	т/ч	т/ч	-	-	-	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С	°С
1	Газ	90	100	116,3	40	70	1250	1625	0,2	0,5	250	625	1875	0,030	0,024	0,446	72,4	74,8	76,7	78,6	63,8	91,2	118,7	113,3	91,2
	Мазут	90	70	81,41	40	90	1250	1625	0,2	0,5	250	625	1875	0,089	0,073	0,338	95,0	100,0	104,1	108,2	82,0	96,5	111,1	110,7	96,5
2	Газ	90	100	116,3	40	70	1250	1375	0,3	0,4	375	500	1750	0,030	0,024	0,446	72,4	74,8	76,7	78,6	64,6	97,0	129,5	118,6	97,0
	Мазут	90	100	116,3	50	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,071	0,058	0,371	75,7	81,4	86,0	90,6	82,5	112,2	141,9	133,3	112,2
3	Газ	90	100	116,3	60	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,030	0,024	0,446	72,4	74,8	76,7	78,6	74,9	110,6	146,3	135,0	110,6
	Мазут	90	100	116,3	60	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,071	0,058	0,371	75,7	81,4	86,0	90,6	84,5	114,2	143,9	135,0	114,2
4	Газ	90	100	116,3	70	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,030	0,024	0,446	72,4	74,8	76,7	78,6	76,9	112,6	148,3	136,7	112,6
	Мазут	90	100	116,3	40	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,071	0,058	0,371	75,7	81,4	86,0	90,6	80,5	110,2	139,9	131,7	110,2

Графическое отображение подогрева воды по водяным трактам котла.

C =	4187	Δt <sub>yx</sub>	ΔP <sub>ор</sub>
Дж/(кг·К)		°С	%
1	Газ	-18,78	0,939
	Мазут	-21,50	1,075
2	Газ	-12,98	0,649
	Мазут	-5,81	0,291
3	Газ	0,59	-0,029
	Мазут	-3,81	0,191
4	Газ	2,59	-0,129
	Мазут	-7,81	0,391

1. Традиционная схема питания котла ПТВМ-100 (рис. 6.3а)



2. Вариант КСП котла ПТВМ-100 (рис. 6.11)

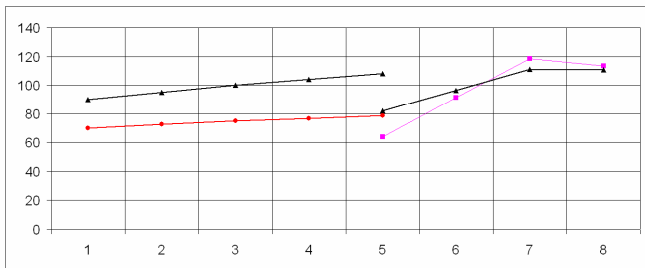
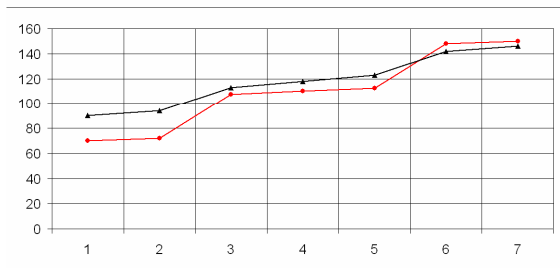
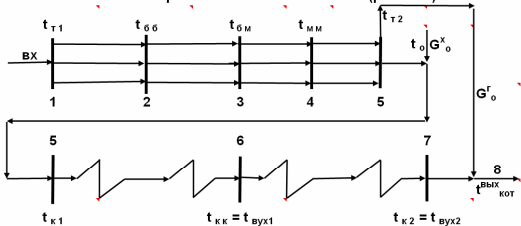


Рис. 6.11ф.(МонКСП). Исследование режимов работы модернизированного котла в сравнении с его традиционной конструкцией.

Котлы, модернизированные на базе 4-х ходовой схемы циркуляции (рис. 6.11 – 6.13) имеют еще одно немаловажное преимущество. Они могут работать не только в «крайних» режимах, т.е. в основном и пиковом с подогревом воды от 70 до 150°С и от 110 до 150°С. Организация КСП в этом случае позволяет вести также и промежуточные режимы работы котла между основным и пиковым. Это является существенным резервом по поддержанию необходимой температуры воды в прямой теплосети в случае снижения нагрузки на бойлерах ТЭЦ (или при полном их отключении), не прибегая к помощи насосов рециркуляции.

### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

1. Модернизация водогрейных котлов путем организации секций с КСП является актуальным мероприятием, которое рекомендуется выполнять в котельных, работающих как в основном, так и в пиковом режимах.
2. Разработан комплекс программных средств, позволяющих решать задачу организации КСП на стадии проектирования как старых котлов, так и при разработке котлов новой конструкции.
3. Принцип КСП применим также для водяного экономайзера паровых котлов, как это в порядке примера было рассмотрено в разделе 4.3 применительно к котлу типа ДКВР.

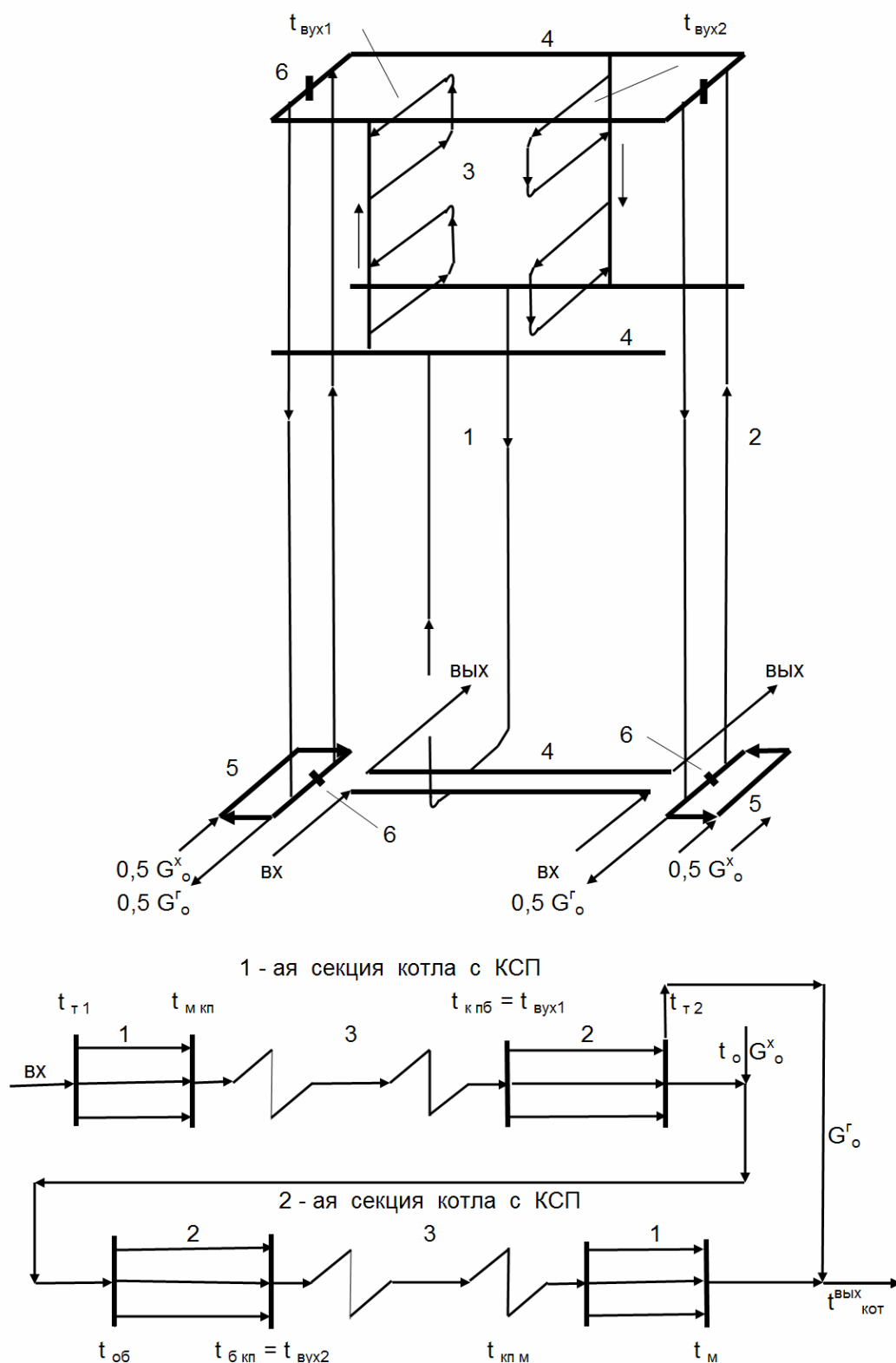


Рис. 6.12. (МонКСП). Вариант модернизации контуров циркуляции водогрейных котлов типа ПТВМ-50, 100 с модернизированной 4-х ходовой и 2-х секционной каскадной схемой питания (КСП).  $t_{Т1}$ ,  $t_{Мкп}$ ,  $t_{Кпб} = t_{вых1}$ ,  $t_{Т2}$ ,  $t_{об}$ ,  $t_{бкп} = t_{вых2}$ ,  $t_{кпм}$ ,  $t_{м}$  - значения температур на переходных границах по водяному тракту котла.  $t_{о}$  и  $t_{вых1,2}$  - температура обратной сетевой воды из теплосети и температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов;  $t_{ВЫХ_КОТ}^{ВЫХ}$  - температура воды на выходе из котла.  $G_o^r$  и  $G_o^x$  - промежуточный отбор горячей и ввод холодной обратной сетевой воды в тракт котла. 1, 2 - экранные трубы; 3 - конвективный пучок; 4 - коллекторы; 5 - перепускные трубы; 6 - заглушка.

Рис.6.3а/6.12

Исследование и сопоставление с традиционным вариантом температурных режимов работы водогрейного котла ПТВМ-100 с модернизированной 4-х ходовой и 2-х секционной каскадной схемой питания (КСП).

1. Традиционная схема питания котла (рис. 6.3а)

Обозн.	$Q_H$	$Q_{KT}$	$G$	$t_{T1}$	$\Psi_6$	$\Psi_{EII}$	$\Psi_M$	$t_{Mкп}$	$t_{кп6}$	$t_6$	$t_{6кп}$	$t_{кпM}$	$t_M$	$t^{B\text{B}\text{X}}_{\text{KOT}}$	$t^{CP}_{\text{Kл}}$
Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	МВт	т/ч	°C	-	-	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Газ	90	100	116,3	1250	70	0,030	0,446	0,024	71,9	107,6	110,0	112,4	148,1	150,0	110,0
Мазут	90	100	116,3	1250	104	0,071	0,371	0,058	108,6	138,3	144,0	149,7	179,4	184,0	144,0

2. Вариант каскадной схемы питания котла (рис. 6.12)

Режи-	Обозн.	$Q_H$	$Q_{KT}$	$t_0$	$t_{T1}$	$G_1$	$G_2$	$g'_0$	$g''_0$	$G'_0$	$G''_0$	$G^{B\text{B}\text{X}}_{\text{KOT}}$	$\Psi_6$	$\Psi_M$	$\Psi_{KII}$	$t_{Mкп}$	$t_{кп6}$	$t_{T2}$	$t_{об}$	$t_{6кп}$	$t_{кпM}$	$t_M$	$t^{B\text{B}\text{X}}_{\text{KOT}}$	$t^{CP}_{\text{Kл}}$	
мы	Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	МВт	°C	°C	т/ч	т/ч	-	-	т/ч	т/ч	-	-	-	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1	Газ	90	100	116,3	40	70	1250	1375	0,4	0,5	500	625	1875	0,030	0,024	0,446	71,9	107,6	110,0	78,2	80,4	112,8	114,5	113,3	93,2
	Мазут	90	70	81,41	40	104	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,089	0,073	0,338	108,1	127,0	132,0	113,6	118,6	137,5	141,6	140,0	122,8
2	Газ	90	100	116,3	40	70	1250	1375	0,3	0,4	375	500	1750	0,030	0,024	0,446	71,9	107,6	110,0	84,5	86,7	119,2	120,9	118,6	96,4
	Мазут	90	100	116,3	50	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,071	0,058	0,371	74,6	104,3	110,0	98,0	103,7	133,4	138,0	133,3	104,0
3	Газ	90	100	116,3	60	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,030	0,024	0,446	71,9	107,6	110,0	100,0	102,4	138,1	140,0	135,0	105,0
	Мазут	90	100	116,3	60	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,071	0,058	0,371	74,6	104,3	110,0	100,0	105,7	135,4	140,0	135,0	105,0
4	Газ	90	100	116,3	70	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,030	0,024	0,446	71,9	107,6	110,0	102,0	104,4	140,1	142,0	136,7	106,0
	Мазут	90	100	116,3	40	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,071	0,058	0,371	74,6	104,3	110,0	96,0	101,7	131,4	136,0	131,7	103,0

Графическое отображение подогрева воды по водяным трактам котла.

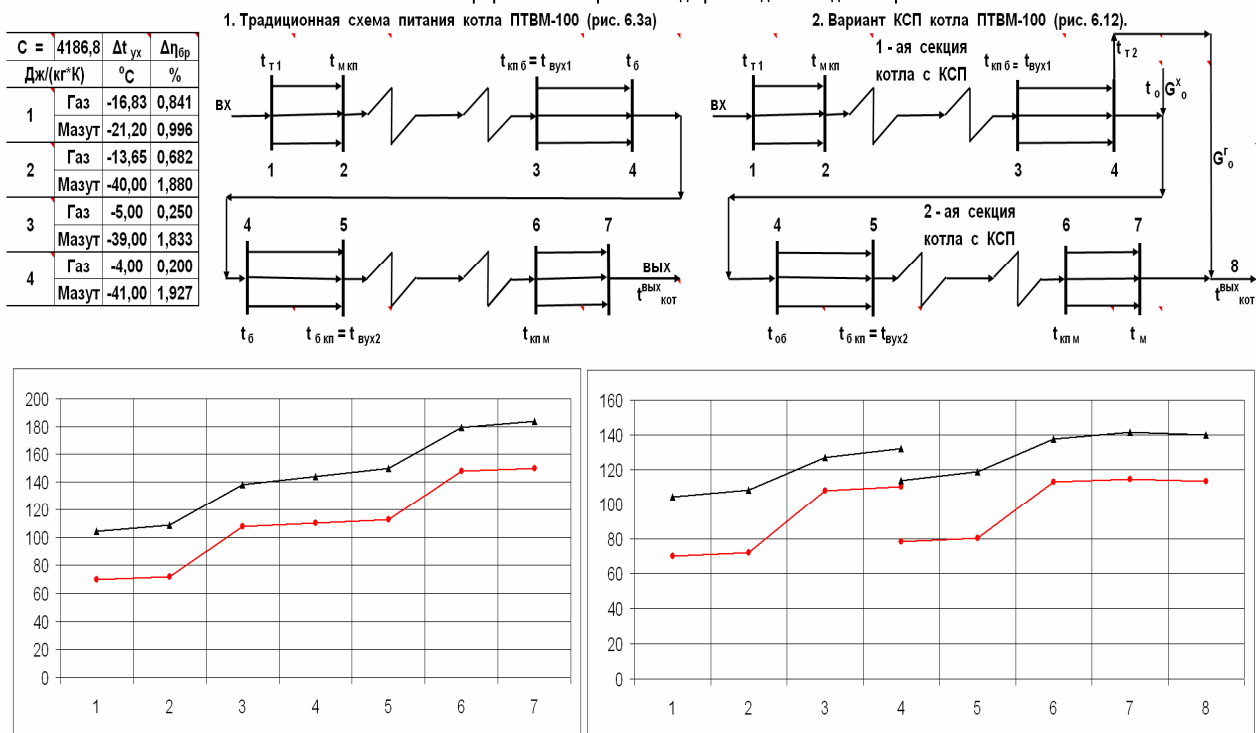


Рис. 6.12ф. (МонКСП). Исследование режимов работы модернизированного котла в сравнении с его традиционной конструкцией.

### 6.5. Исследование режимов работы водогрейного котла с двухсекционной каскадной схемой питания.

Рассмотрим принципиальные возможности схемы котельной (рис. 6.14), состоящей из трех ( $i = 1 \div 3$ ) модернизированных котлов с КСП [73]. В данном случае основной режим работы котлов (рис. 6.1, рис.6.14) является частным случаем работы их в пиковом режиме, т.е.  $t_{TЭЦ} = t_0$ . Причем, потоки воды  $G_{TЭЦi} \geq 0$  через ТЭЦ могут либо сохраняться без дополнительного подогрева, либо шунтировать ТЭЦ и оказаться равными  $G_{ски} = G_{ci} - G_{TЭЦi}$ . Методы расчета оптимальных нагрузок котлов с КСП в принципе одинаковы как при работе в пиковом, так и в основном режимах. Двойными линиями (рис. 6.14) показаны реверсивные трубопроводы, по которым вода подается либо в направлении от т.Б к т.А (КСП-А), либо в направлении от т. А к т.Б (КСП-Б). Из анализа этой схемы следует, что каждый из всех ее параметров « $\Pi_i$ » (потоков массы и их температур в расчете



на один  $i$ -ый котел) определяется как функция трех независимых переменных [70]:

$$\Pi_i = f(G_{\Pi i}, G_{\Pi 2i}, G_{\text{оки}}). \quad (6.28)$$

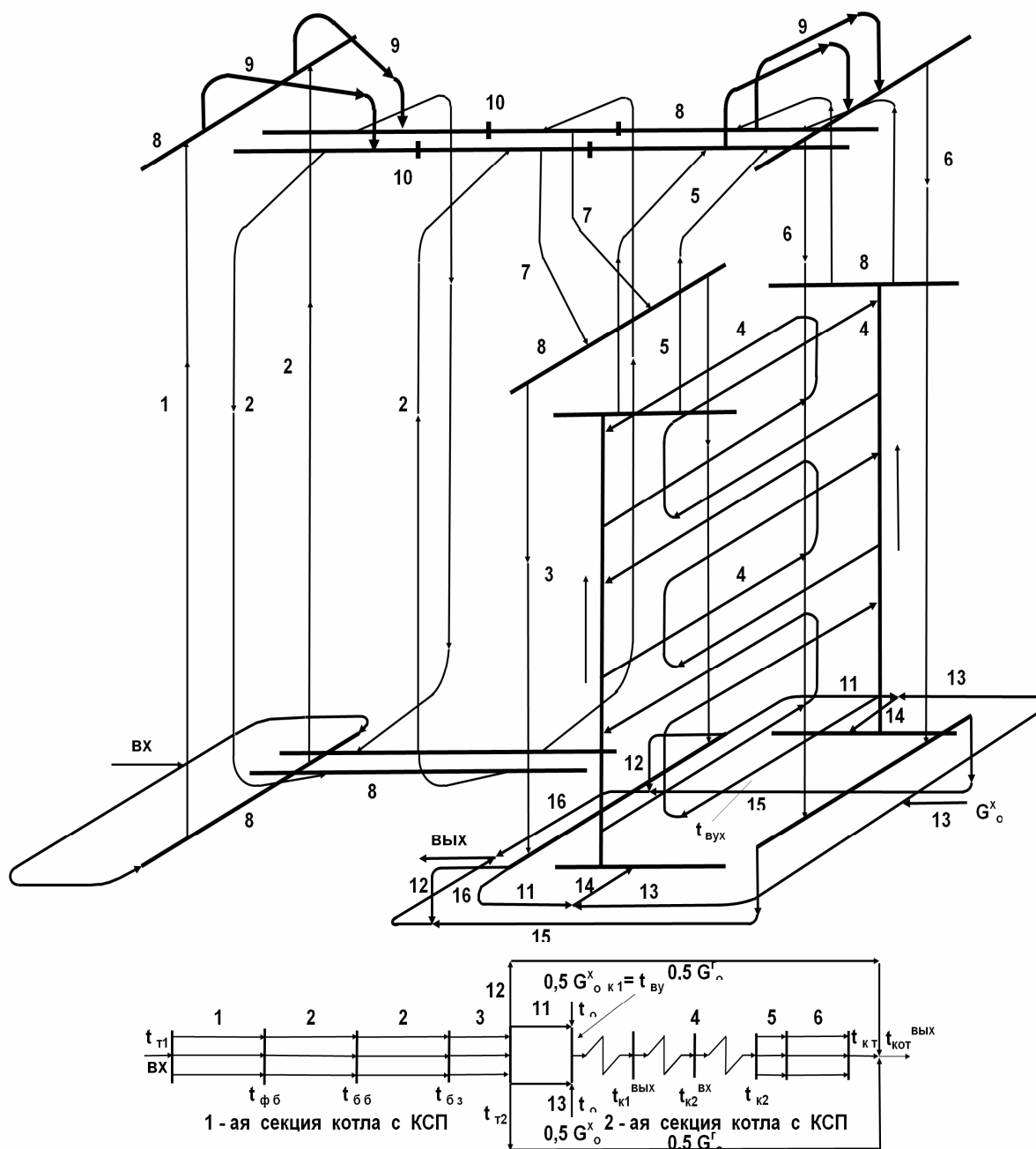


Рис. 6.13.(МонКСП). Вариант модернизации контуров циркуляции водогрейного котла типа КВГМ с организацией КСП. 1 - фронтальный экран; 2, 3 - боковые и задний экраны в топке; 4 - конвективный пучок в газоходе; 5 - боковые экраны в верхней части газохода; 6 - экранные трубы на задней стенке газохода; 7 - фестон; 8 - коллекторы; 9 - перепускные трубы; 10 - заглушки; 11 - отвод части воды, нагретой в экранах топки, в конвективный пучок; 12 - отвод части воды ( $G_o^r$ ), нагретой в экранах топки, в теплотрассу; 13 - подвод холодной обратной сетевой воды ( $G_o^x$ ); 14 - подача смешанной воды в тракт конвективного пучка; 15 - котловая вода на выходе из поверхностей нагрева, расположенных в газоходе котла; 16 - котловая вода на выходе из котла;  $t_{\text{вух}}$  - температура воды в поверхностях конвективного пучка, расположенных в сечении уходящих газов.

Рис.6.6а/б.13|Исслед. и сопоставление с традиц. Вариантом темпер. режи. работы водогр. котла КВГМ-100 с модернизированной 4-х ходовой и 2-х секц. каскадной схемой питания (КСП).

Обозн.		$Q_n$	$Q_{KT}$	$G$	$t_{T1}$	$\Psi_{\phi}$	$\Psi_{\delta}$	$\Psi_{\gamma}$	$\Psi_{Kп}$	$\Psi_r$	$t_{\phi 6}$	$t_{66}$	$t_{63}$	$t_{T2}$	$t_{K1}$	$t_{K2}^{ВЫХ}$	$t_{K2}$	$t_{KOT}^{ВЫХ}$	$t_{KП}^{CP}$
Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	МВт	т/ч	°C	-	-	-	-	-	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Газ	90	100	116,3	1250	70	0,032	0,172	0,064	0,704	0,027	72,6	79,5	86,4	91,5	110,3	129,0	147,8	150,0	119,7
Мазут	90	70	81,41	1250	90	0,071	0,239	0,142	0,533	0,014	94,0	100,7	107,4	115,3	125,3	135,2	145,2	146,0	130,3

Режи-мы	Обозн.	$Q_n$	$Q_{KT}$	$t_o$	$t_{T1}$	$G_1$	$G_2$	$g'_o$	$g''_o$	$G'_o$	$G''_o$	$G_{KOT}^{ВЫХ}$	$\Psi_{\phi}$	$\Psi_{\delta}$	$\Psi_{\gamma}$	$\Psi_{Kп}$	$\Psi_r$	$t_{\phi 6}$	$t_{66}$	$t_{63}$	$t_{T2}$	$t_{K1}$	$t_{K1}^{ВЫХ}$	$t_{K2}$	$t_{K2}^{ВЫХ}$
Разм.	Гкал/ч	Гкал/ч	МВт	°C	°C	т/ч	т/ч	-	-	т/ч	т/ч	т/ч	-	-	-	-	-	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1	Газ	90	100	116,3	40	60	1250	1375	0,2	0,3	250	375	1750	0,032	0,172	0,064	0,704	0,027	62,6	69,5	76,4	81,5	70,2	87,2	104,3
	Мазут	90	70	81,41	40	90	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1600	0,071	0,239	0,142	0,533	0,014	94,0	100,7	107,4	115,3	100,3	110,2	120,2
2	Газ	90	100	116,3	40	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,032	0,172	0,064	0,704	0,027	72,6	79,5	86,4	91,5	81,2	100,0	118,7
	Мазут	90	100	116,3	40	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,054	0,256	0,109	0,558	0,023	74,4	84,6	94,8	103,5	90,8	105,7	120,6
3	Газ	90	100	116,3	40	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,032	0,172	0,064	0,704	0,027	72,6	79,5	86,4	91,5	81,2	100,0	118,7
	Мазут	90	100	116,3	40	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,054	0,256	0,109	0,558	0,023	74,4	84,6	94,8	103,5	90,8	105,7	120,6
4	Газ	90	100	116,3	40	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,032	0,172	0,064	0,704	0,027	72,6	79,5	86,4	91,5	81,2	100,0	118,7
	Мазут	90	100	116,3	40	70	1250	1250	0,2	0,2	250	250	1500	0,054	0,256	0,109	0,558	0,023	74,4	84,6	94,8	103,5	90,8	105,7	120,6

2. Вариант каскадной схемы питания котла (рис. 6.13)

С =	$t_{K2}$	$t_{KT}$	$t_{KOT}^{ВЫХ}$	$t_{KП}^{CP}$	$\Delta t_{yx}$	$\Delta \Pi_{бр}$	
Дж/(кг·К)	°C	°C	°C	°C	°C	%	
1	Газ	121,4	123,4	116,9	95,8	-23,9	1,194
	Мазут	130,1	130,9	128,3	115,2	-15,1	0,708
2	Газ	137,50	139,7	131,7	109,4	-10,30	0,515
	Мазут	135,48	137,3	131,7	113,1	-17,12	0,804
3	Газ	137,50	139,7	131,7	109,4	-10,30	0,515
	Мазут	135,48	137,3	131,7	113,1	-17,12	0,804
4	Газ	137,50	139,7	131,7	109,4	-10,30	0,515
	Мазут	135,48	137,3	131,7	113,1	-17,12	0,804

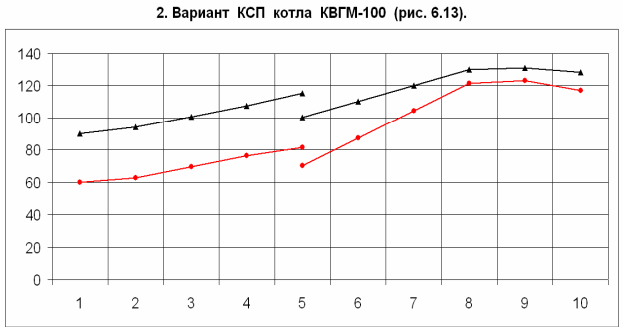
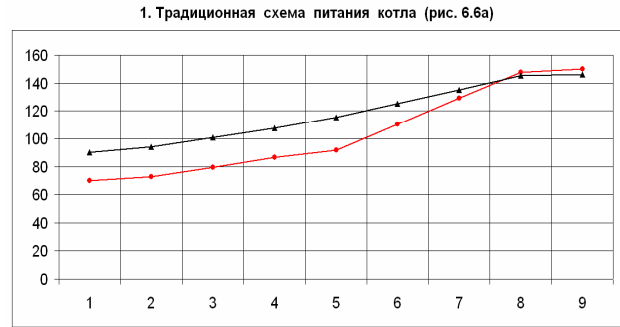
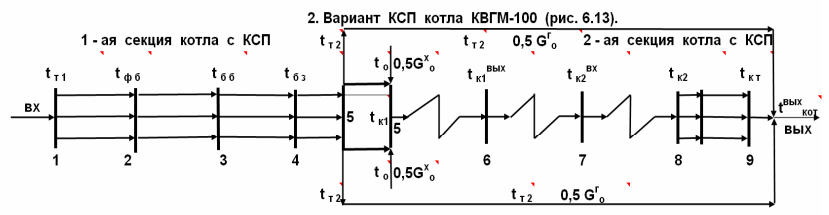
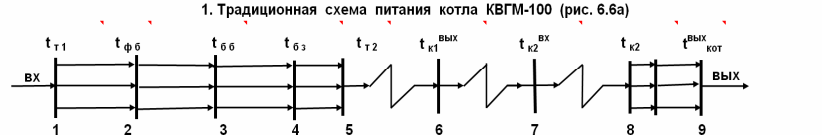


Рис. 6.13ф. (МонКСП). Исследование режимов работы модернизированного котла в сравнении с его традиционной конструкцией.

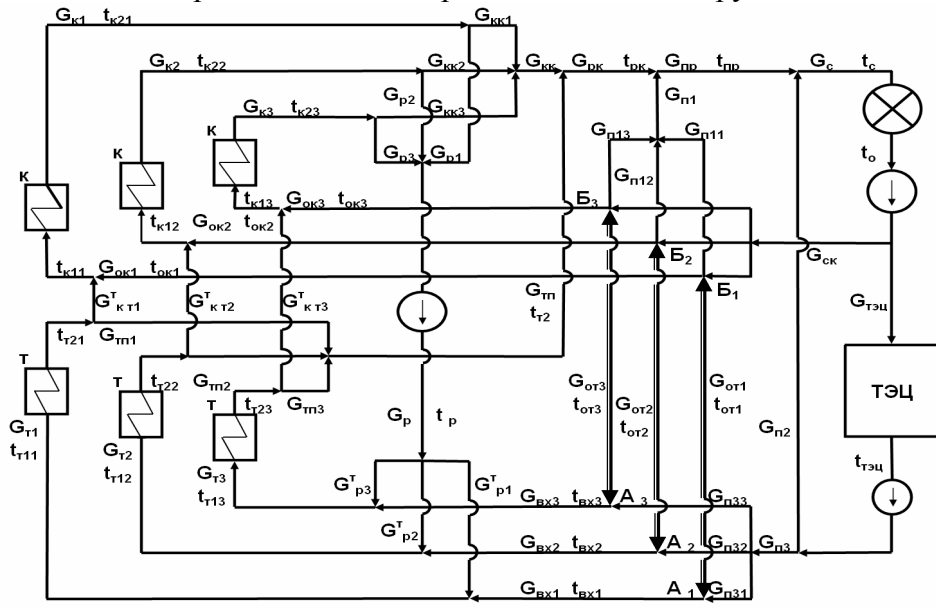


Рис. 6.14. Принципиальная схема пиковой котельной, состоящей из трёх котлов с КСП-А и КСП-Б. Каждый из котлов разделен на 2 секции: "т" и "к" при групповой компоновке насосов рециркуляции. Трубопроводы между точками А<sub>1,2,3</sub> и Б<sub>1,2,3</sub> являются реверсивными. КСП-А соответствует случаю движения потоков из т. Б<sub>1,2,3</sub> в т. А<sub>1,2,3</sub>; КСП-Б - наоборот: из т. А<sub>1,2,3</sub> в т. Б<sub>1,2,3</sub>.

Таблица 6.4. Примерный подогрев воды по секциям «Т» и «К» котлов типа ПТВМ-50, 100 при разных вариантах организации КСП в сравнении с традиционной схемой питания

№№ рис. традиц., $g_{ок} \geq 0$	Вар. реж.	$t_{Т1}$	$t_{Т2}$	$t_{к1}$	$t_{к2}$	$t_{срк}$	$t_{кот}^{ср}$	$\Delta\eta_{бр}$	
Рис. 6.2а, традиц.	тр	104 70	- -	- -	150 116	127,62 93,62	150 116	- -	
Рис. 6.9	$g_{ок} = 0$	0	104 70	117,8 83,8	117,8 83,8	150 116	133,9 99,9	150 116	-0,314 -0,314
		$g_{ок} > 0$	1	104	117,8	104	136,2	120,1	132,7
	2		104	117,8	83,8	116	99,9	116,7	1,386
	3	104	117,8	70	102,2	86,1	109,2	2,076	
4	70	83,8	70	102,2	86,1	95,2	0,376		
Рис. 6.10	$g_{ок} = 0$	0	104 70	127,62 93,62	127,62 93,62	150 116	127,62 93,62	150 116	0 0
		$g_{ок} > 0$	1	104	127,62	109,72	126,38	115,81	126,6
	2		104	127,62	93,62	116	110,62	119,85	0,85
	3	104	127,62	70	92,38	98,81	108,43	1,441	
4	70	93,62	70	92,38	81,81	92,89	0,591		
Рис. 6.3а, традиц.	тр	70	-	-	150	110	150	-	
Рис. 6.11	$g_{ок} = 0$	0	70	93	93	150	121,5	150	-0,575
		$g_{ок} > 0$	1	70	93	70	127	98,5	113
	2		110	134	93	150	110	144,4	0
3	110	134	70	127	98,5	130,2	0,575		
Рис. 6.12	$g_{ок} = 0$	0	70	110	110	150	110	150	0
		$g_{ок} > 0$	1	70	110	70	110	90	110
	2		110	150	110	150	130	150	-1,0
3	110	150	70	110	110	128,7	0		

Примечание: в Таблице 6.4 знак (-) означает уменьшение  $\eta_{бр}$ , знак (+) – увеличение.

Исходными данными для расчетов режимов работы котлов с КСП являются следующие (рис. 6.14): температуры воды прямой  $t_c$ , обратной  $t_o$  и на выходе из ТЭЦ  $t_{ТЭЦ}$ , а также нагрузки котлов  $Q_{кти}$ . Перепады температур, приходящиеся на каждую из секций котла «Т» и «К» равны:

$$A_{Ti} = t_{Т2i} - t_{Т1i} = Q_{кти} (1 + \varphi_i)^{-1} G_{Ti}^{-1} C^{-1}, \quad (6.29a)$$

$$A_{ki} = t_{к2i} - t_{к1i} = Q_{кти} \varphi_i (1 + \varphi_i)^{-1} G_{ki}^{-1} C^{-1}, \quad (6.29б)$$

где  $Q_{кти} = Q_{ki} + Q_{Ti}$  – суммарная нагрузка обеих секций котла;  $\varphi_i$  – соотношение между тепловосприятиями поверхностей нагрева обеих секций:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= Q_{ki} Q_{Ti}^{-1} = \Psi_{ki} \Psi_{Ti}^{-1}, \\ \Psi_{ki} &= Q_{ki} Q_{кти}^{-1}, \\ \Psi_{Ti} &= Q_{Ti} Q_{кти}^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (6.30)$$

Значения показателей  $\Psi_{ki}$  и  $\Psi_{ti}$ , входящих в формулы (6.30), представляют собой тепловосприятости секций «к» и «т», выраженные в долях от суммарной нагрузки котла  $Q_{kti}$ . Величина их зависит от состава поверхностей нагрева, образующих секции «к» и «т», и расходов воды  $G_{ti}$  и  $G_{ki}$  через них. В частности, при модернизации котлов типа ПТВМ-50, 100 по варианту, показанному на рис. 6.12, состав секций «к» и «т» одинаков. Обе секции включают в себя конвективные пучки труб (инд. кп), панели с удлиненными (инд. б) и укороченными (инд. м) экранами, т.е. в данном случае  $\Psi_T \approx \Psi_K = \Psi_M + \Psi_{кп} + \Psi_б = 0,5$ . При модернизации котлов того же типа по варианту на рис. 6.11 показатели  $\Psi_K = 2\Psi_{кп}$ ,  $\Psi_T = 2(\Psi_б + \Psi_M)$ , а котла КВГМ-100 варианту, показанному на рис. 6.13, т.е.  $\Psi_T = \Psi_ф + \Psi_б + \Psi_з$ ,  $\Psi_K = \Psi_{кп} + \Psi_г$ . Каждая из этих величин определяется по формуле (6.7) и данным в таблице 6.1. Перепады температур на этих участках обогрева воды в котлах вычисляются по формуле (6.6). При числе котлов  $K$  из учета того, что  $G_c = \sum_{i=1}^K G_{ci}$  и  $G_{тэц} = \sum_{i=1}^K G_{тэци}$ , массовые потоки  $G_{ci}$  и  $G_{тэци}$  в расчете на один котел определяются по формулам (5.37) в главе 5 при  $Q_i = Q_{kti}$ .

Остальные значения потоков массы и их температур согласно схеме на рис.5.14 определяются на основании уравнений теплового и материального балансов, и представляют собой функции (6.28).

Для котельных с групповой установкой насосов рециркуляции в расчёте на каждый котел  $i = 1 \div K$

$$G_{pi}^T = G_{pi} t_{k2i} t_p^{-1}, \quad (6.31)$$

где

$$t_p = \sum_{i=1}^K (G_{pi} t_{k2i}) \left( \sum_{i=1}^K G_{pi} \right)^{-1}. \quad (6.32)$$

Для котельных с установкой индивидуальных насосов рециркуляции задача упрощается:  $G_{pi}^T = G_{pi}$ ,  $t_p = t_{pi} = t_{k2i}$ .

Диапазон изменения каждой из независимых переменных (в дальнейшем индекс «i» опускаем)  $G_{п1}$ ,  $G_{п2}$  и  $G_{ок}$  в уравнениях (6.28) определяется физическим смыслом самих функций « $\Pi_i$ », характеризующих технологический процесс (рис. 6.14) подогрева воды в котельной. Исходя из этого, была разработана и сведена в таблицы 6.5, 6.6 система четырех основных ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) и некоторых дополнительных условий количественных соотношений теплоносителей, позволяющая определять такие предельные значения переменных  $G_{п1}$ ,  $G_{п2}$  и  $G_{ок}$ , при которых парадоксальные результаты в последующих расчетах исключаются. При любом из четырёх основных условий ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) могут быть установлены пять ( $\gamma = 1, 2, 3, 4, 5$ ) предель-

Таблица 6.5. Предельные значения потоков  $G_{п1}$ ,  $G_{п2}$ ,  $G_{ок}$  при работе водогрейного котла с КСП-А и КСП-Б (рис. 6.14)

j	Условия		$\gamma_{А,Б}$	$G_{п1}$		$G_{п2}$		$G_{ок}$	
	основные	дополнительные		$G_{к} \leq G_{т}$	$G_{к} \geq G_{т}$	$G_{к} \leq G_{т}$	$G_{к} \geq G_{т}$	$G_{к} \leq G_{т}$	$G_{к} \geq G_{т}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$G_{ск} \leq G_{к}$ $G_{тэц} \leq G_{т}$	$G_{с} \gg G_{т}$	1А	0		0		$G_{с} - G_{тэц}$	
		$G_{с} \geq G_{т}$	2А	0		0		$G_{с} - G_{т}$	
		$G_{с} \geq G_{т}$	3А	$G_{с} - G_{т}$	$G_{с} - G_{к}$	0		0	$G_{к} - G_{т}$
		$G_{с} \gg G_{т}$	4А	$G_{с} - G_{тэц}$	$G_{с} - G_{тэц} - G_{к} + G_{т}$	0		0	$G_{к} - G_{т}$
		$G_{с} \gg G_{т}$	5А	$G_{с} - G_{тэц}$	$G_{с} - G_{тэц} - G_{к} + G_{т}$	$G_{к} - G_{т} + G_{тэц}$		0	$G_{к} - G_{т}$
		$G_{с} \geq G_{т}$	1Ба	0		0		$G_{к}$	
		$G_{с} \leq G_{т}$	1Бб	0		0		$G_{к} - G_{т} + G_{с}$	$G_{с}$
		$G_{с} \geq G_{т}$	4Ба	$G_{к}$	$G_{т}$	0		0	$G_{к} - G_{т}$
		$G_{с} \leq G_{т}$	4Бб	$G_{к} - G_{т} + G_{с}$	$G_{с} - G_{к} + G_{т}$	0		0	$G_{к} - G_{т}$
		$G_{с} \geq G_{т}$	5Б	$G_{с} - G_{т} + G_{к}$	$G_{с} + G_{т} - G_{к}$	0		0	$G_{к} - G_{т}$

2		$G_c \gg G_T + G_K$	2А	0	$G_{ТЭЦ} - G_T$	$G_c - G_{ТЭЦ}$
---	--	---------------------	----	---	-----------------	-----------------

Продолжение таблицы 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2	$G_{СК} \leq G_K$ $G_{ТЭЦ} \geq G_T$	$G_c \gg G_T + G_K$	3А	$G_c - G_{ТЭЦ}$	$G_c - G_{ТЭЦ} -$ $-G_K + G_T$	$G_{ТЭЦ} - G_T$		0	$G_K - G_T$	
		$G_c \gg G_T + G_K$	5А	$G_c - G_{ТЭЦ}$	$G_c - G_{ТЭЦ} -$ $-G_K + G_T$	$G_K - G_T - G_{ТЭЦ}$		0	$G_K - G_T$	
		$G_c \leq G_T + G_K$	1Б		0		0		$G_K$	
		$G_c \leq G_T + G_K$	2Ба		0		0		$G_c - G_T$	
		$G_c \geq G_T + G_K$	2Бб		0		$G_c - G_T - G_K$		$G_K$	
		$G_c \leq G_T + G_K$	3Ба	$G_c - G_T$	$G_c - G_K$		0		0	$G_K - G_T$
		$G_c \geq G_T + G_K$	3Бб	$G_K$	$G_T$		$G_c - G_T - G_K$		0	$G_K - G_T$
		$G_c \leq G_T + G_K$	4Ба	$G_c - G_T +$ $+G_K$	$G_c + G_T -$ $-G_K$		0		0	$G_K - G_T$
		$G_c \geq G_T + G_K$	4Бб	$2G_K$	$2G_T$		$G_c - G_T - G_K$		0	$G_K - G_T$
3	$G_{СК} \geq G_K$ $G_{ТЭЦ} \leq G_T$ $G_{СК} \geq G_K$	$G_c \leq G_T + G_K$	1Аа		0		0		$G_K$	
		$G_c \geq G_T + G_K \geq$ $\geq G_c - G_{ТЭЦ}$	1Аб		0		$G_c - G_T - G_K$		$G_K$	

	$G_c \geq G_T + G_K + G_{ТЭЦ}$	1Ав	$G_c - G_{ТЭЦ} - G_T - G_K$	$G_{ТЭЦ}$	$G_K$
	$G_c \leq G_T + G_K$	2Аа	0	0	$G_c - G_T$
	$G_c \geq G_T + G_K$	2Аб	$G_c - G_T - G_K$	0	$G_K$

Окончание таблицы 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	$G_{ск} \geq G_K$ $G_{ТЭЦ} \leq G_T$	$G_c \geq G_T$	3А	$G_c - G_T$	$G_c - G_K$	0	0	$G_K - G_T$	
		$G_c \gg G_T$	4А	$G_c - G_{ТЭЦ}$	$G_c - G_{ТЭЦ} -$ $-G_K + G_T$	0	0	$G_K - G_T$	
		$G_c \gg G_T$	5А	$G_c - G_{ТЭЦ}$	$G_c - G_{ТЭЦ} -$ $-G_K + G_T$	$G_K - G_T + G_{ТЭЦ}$	0	$G_K - G_T$	
		$G_c \gg G_T$	1Б	$G_c - G_{ТЭЦ} - G_K$		0	$G_K$		
		$G_c \gg G_T$	4Б	$G_c - G_{ТЭЦ}$	$G_c - G_{ТЭЦ} -$ $-G_K + G_T$	0	0	$G_K - G_T$	
		$G_c \gg G_T$	5Б	$G_c - G_T + G_K$	$G_c + G_T - G_K$	0	0	$G_K - G_T$	
4	$G_{ск} \geq G_K$ $G_{ТЭЦ} \geq G_T$	$G_c \leq G_T + G_K + G_{ТЭЦ}$	1Аа	0		$G_c - G_T - G_K$	$G_K$		
		$G_c \geq G_T + G_K + G_{ТЭЦ}$	1Аб	$G_c - G_{ТЭЦ} - G_T - G_K$		$G_{ТЭЦ}$	$G_K$		
		$G_c \gg G_T + G_K + G_{ТЭЦ}$	2А	$G_c - G_{ТЭЦ} - G_K$		$G_{ТЭЦ} - G_T$	$G_K$		
		$G_c \gg G_T + G_K + G_{ТЭЦ}$	3А	$G_c - G_{ТЭЦ}$	$G_c - G_{ТЭЦ} -$ $-G_K + G_T$	$G_{ТЭЦ} - G_T$	0	$G_K - G_T$	

$G_{\text{CK}} \geq G_{\text{K}}$ $G_{\text{TЭЦ}} \geq G_{\text{T}}$	$G_{\text{C}} \gg G_{\text{T}} + G_{\text{K}} + G_{\text{TЭЦ}}$	5А	$G_{\text{C}} - G_{\text{TЭЦ}}$	$G_{\text{C}} - G_{\text{TЭЦ}} -$ $- G_{\text{K}} + G_{\text{T}}$	$G_{\text{K}} + G_{\text{TЭЦ}} - G_{\text{T}}$	0	$G_{\text{K}} - G_{\text{T}}$
	$G_{\text{C}} \gg G_{\text{T}} + G_{\text{K}} + G_{\text{TЭЦ}}$	2Б	$G_{\text{C}} - G_{\text{TЭЦ}} - G_{\text{K}}$		$G_{\text{дýö}} - G_{\text{д}}$	<b>0</b>	$G_{\text{K}} - G_{\text{T}}$
	$G_{\text{C}} \gg G_{\text{T}} + G_{\text{K}} + G_{\text{TЭЦ}}$	3Б	$G_{\text{C}} - G_{\text{TЭЦ}}$	$G_{\text{C}} - G_{\text{TЭЦ}} -$ $- G_{\text{K}} + G_{\text{T}}$	$G_{\text{TЭЦ}} - G_{\text{T}}$	0	$G_{\text{K}} - G_{\text{T}}$
	$G_{\text{C}} \gg G_{\text{T}} + G_{\text{K}} + G_{\text{TЭЦ}}$	4Б	$G_{\text{C}} - G_{\text{TЭЦ}} +$ $+ G_{\text{K}}$	$G_{\text{C}} - G_{\text{TЭЦ}} -$ $- G_{\text{K}} + 2G_{\text{T}}$	$G_{\text{TЭЦ}} - G_{\text{T}}$	0	$G_{\text{K}} - G_{\text{T}}$



Таблица 6.6

Рабочие значения потоков  $G_{п1}$ ,  $G_{п2}$  при работе  
водогрейного котла с КСП-А и КСП-Б (рис. 6.14)

j	КСП-А		КСП-Б	
	Диапазон $\gamma_A$	Условия	Диапазон $\gamma_B$	Условия
1	1А.2А	$(G_{п2})_{12} = 0$	1Ба.4Ба	$(G_{п2})_{14} = 0$
	2А.3А	$(G_{п2})_{23} = 0$	4Ба.5Б	$(G_{п2})_{45} = 0$
	3А.4А	$(G_{п2})_{34} = 0$	1Бб.4Бб	$(G_{п2})_{14} = 0$
	4А.5А	при $G_K \leq G_T$ $(G_{п1})_{45} = G_C - G_{ТЭЦ}$	4Бб.5Б	$(G_{п2})_{45} = 0$
при $G_K \geq G_T$ $(G_{п1})_{45} =$ $= G_C - G_{ТЭЦ} - G_K + G_T$		-	-	
2	2А.3А	$(G_{п2})_{23} = G_{ТЭЦ} - G_T$	1Б.2Ба	$(G_{п2})_{12} = 0$
	3А.5А	при $G_K \leq G_T$ $(G_{п1})_{35} = G_C - G_{ТЭЦ}$	2Ба.3Ба	$(G_{п2})_{23} = 0$
		при $G_K \geq G_T$ $(G_{п1})_{35} =$ $= G_C - G_{ТЭЦ} - G_K + G_T$	2Бб.3Бб	$(G_{п2})_{23} = G_C - G_T -$ $- G_K$
	-	-	3Ба.4Ба	$(G_{п2})_{34} = 0$
3Бб.4Бб			$(G_{п2})_{34} = G_C - G_T -$ $- G_K$	
3	1Аа.2Аа	$(G_{п2})_{12} = 0$	1Б.4Б	$(G_{i2})_{14} = 0$
	1Аб.2Аб	$(G_{п12})_{12} = G_C - G_T - G_K$	4Б.5Б	$(G_{п2})_{45} = 0$
	1Ав.2Аб	$(G_{п12})_{12} = G_C - G_T - G_K$		
	2Аа.3А	$(G_{п2})_{23} = 0$	-	-
	2Аб.3А	$(G_{п2})_{23} = 0$		
	3А.4А	$(G_{п2})_{34} = 0$		
	4А.5А	при $G_K \leq G_T$ $(G_{п1})_{45} = G_C - G_{ТЭЦ}$	-	-
при $G_K \geq G_T$ $(G_{п1})_{45} =$ $= G_C - G_{ТЭЦ} - G_K + G_T$				

4	1Аа.2А	$(G_{п12})_{12} = G_c - G_T - G_k$	2Б.3Б	$(G_{п2})_{23} = G_{тэц} - G_T$
	1Аб.2А	$(G_{п12})_{12} = G_c - G_T - G_k$	3Б.4Б	$(G_{п2})_{34} = G_{тэц} - G_T$
	2А.3А	$(G_{п2})_{23} = G_{тэц} - G_T$	-	-
	3А.5А	при $G_k \leq G_T$ $(G_{п1})_{35} = G_c - G_{тэц}$		
при $G_k \geq G_T$ $(G_{п1})_{35} =$ $= G_c - G_{тэц} - G_k + G_T$				

ных режимов, каждый из которых характеризуется температурным уровнем воды в секции «к» и величиной загрузки насоса рециркуляции  $G_p \geq 0$  (в расчете на один котел). В режиме  $\gamma=1$  температура воды  $t_{к1}$  на входе в секцию «к» устанавливается минимальной. Загрузка насоса рециркуляции в этом случае  $G_p \geq 0$ . В режимах  $\gamma=2$  и  $\gamma=3$ , а также в промежуточных между ними, загрузка насоса рециркуляции  $G_p = 0$ . В предельном режиме  $\gamma=2$  температура  $t_{к1}$  оказывается наименьшей, а в режиме  $\gamma=3$  – наибольшей. Переход от режима  $\gamma=3$  к режиму  $\gamma=4$  осуществляется путем одновременного увеличения потоков  $G_p > 0$ ,  $G_{п1} > 0$  при  $G_{п2} = \text{const}$ . Температуры воды  $t_{т1}$  и  $t_{к1}$  на входе в секции «т» и «к» возрастают. Дальнейший рост этих температур продолжается аналогично при переходе от режима  $\gamma=4$  к режиму  $\gamma=5$ : поток рециркуляции ( $G_p > 0$ ) продолжает возрастать за счет последующего увеличения  $G_{п2}$  при  $G_{п1} = \text{const}$ . В режиме  $\gamma=5$  (по сравнению с режимом  $\gamma=1$ ) температура воды оказывается максимальной.

Выявление предельных (min и max) значений параметров « $\Pi_i$ » еще не решает вопросов оптимизации режима работы котла. Задача оптимизации сводится к выявлению оптимально-допустимых режимов работы котла с учетом определенных ограничений по расходам потоков воды, температур ее на входе и выходе из него. В частности [73], (индекс 1 опускаем):

$$\left. \begin{aligned}
 t_{т1}^{\text{доп}} &\leq t_{т1}^p \leq t_{т2}^{\text{пред}} - A_T, \\
 t_{к1}^{\text{доп}} &\leq t_{к1}^p \leq t_{к2}^{\text{пред}} - A_K \\
 t_{т2}^p &\leq t_{т2}^{\text{пред}}, \\
 G_{п1}^p &\geq 0, \\
 G_{п2}^p &\geq 0, \\
 G_{ок}^p &\geq 0, \\
 G_{от}^p &\geq 0,
 \end{aligned} \right\} \quad (6.33)$$

Таблица 6.7  
 Расчетные параметры режимов работы котла КВГМ-100 с каскадной (А, Б)  
 и традиционной (т р) схемами питания в пиковом режиме

№№ п/п	$G_{\text{ТЭЦ}}/G_c$		$t_c$		$t_{\text{ТЭЦ}}$		$t_o$		$G_c$		$G_{\text{ТЭЦ}}$		$Q_c$		$Q_{\text{ТЭЦ}}$		$Q_{\text{КТ}}$	
	-		$\hat{i} \tilde{N}$		$\hat{i} \tilde{N}$		$\hat{i} \tilde{N}$		т/ч		т/ч		МВт		МВт		МВт	
1÷5 6÷10	1,0 0,5		150		110		70		2250 1500	2250 750	209,3 139,6		104,7 34,9		104,7			
11÷15 16÷20	1,0 0,5		120,6		99,6		59,6		4286 2195	4286 1097,6	304 155,7		199,4 51,06		104,7			
21÷25 26÷30	1,0 0,5		91,2		89,2		49,2		45000 4090,8	45000 2045,4	2198,1 199,8		2093,4 95,15		104,7			
№№ п/п	$\gamma_{\text{А,Б}}$	$t_{\text{T1}}$			$t_{\text{T2}}$			$t_{\text{к1}}$			$t_{\text{к2}}$							
		$\hat{i} \tilde{N}$			$\hat{i} \tilde{N}$			$\hat{i} \tilde{N}$			$\hat{i} \tilde{N}$							
		А	Б	т р	А	Б	т р	А	Б	т р	А	Б	т р					
1	1	-	118,3		-	147,6		-	110		-	153,3						
2	2	110	110		139,3	139,3		139,3	116,1		182,6	159,4						
3	3	110	110	114	139,3	139,3	143,3	139,3	139,3	114	182,6	182,6	157,3					
4	4	-	980,7		-	1010		-	1010		-	1053,3						
5	5	980,7	-		1010	-		1010	-		1053	-						

6	1	124,71	124,1		154	153,3		101,5	85		144,8	128,3			
7	2	93,08	-	114	122,4	-	143,3	113,6	-	114	156,9	-	157,3		
8	3	93,08	-		122,4	-		122,4	-		165,6	-		235,8	424,4
9	4	163,21	351,9		192,5	381,1		192,5	381,1		235,8	424,4			

Продолжение таблицы 6.7

№№ п/п	γ <sub>А,Б</sub>	t <sub>т1</sub>			t <sub>т2</sub>			t <sub>к1</sub>			t <sub>к2</sub>		
		°С			°С			°С			°С		
		А	Б	тр	А	Б	тр	А	Б	тр	А	Б	тр
10	5	980,7	980,7	114	1010	1010	143	1010	1010		1053	1053	
11	1	-	-		-	-		-	-		-	-	
12	2	99,6	99,6		128,9	128,9		128,9	99,6		172,1	142,9	
13	3	99,6	99,6	99,6	128,9	128,9	128,9	128,9	128,9	99,6	172,1	172,2	142,9
14	4	-	970,3		-	999,6		-	999,6		-	1042,9	
15	5	970,3	-		999,6	-		999,6	-		1042,9	-	
16	1	101,1	101,2		130,3	130,5		65,6	63,02		108,9	106,3	
17	2	93,4	-		122,7	-		75,6	-		118,9	-	
18	3	93,4	-	84,6	122,7	-	113,9	122,6	-	84,6	165,9	-	127,9
19	4	113,0	121,8		142,3	151,1		142,3	151,1		185,6	194,4	
20	5	971,3	970,3		1000,6	999,6		1000,6	999,6		1043,8	1042,9	
21	1	-	-		-	-		-	-		-	-	
22	2	89,2	89,2		118,5	118,5		118,5	89,2		161,8	132,5	
23	3	89,2	89,2	89,2	118,5	118,5	118,5	118,5	118,5	89,2	161,8	161,8	132,5
24	4	-	959,9		-	989,2		-	989,2		-	1032,5	
25	5	959,9	-		989,2	-		989,2	-		1032,5	-	

26	1	63,2	-		92,5	-		49,2	-		92,5	-	
27	2	89,2	89,2		118,5	118,5		49,2	-		92,5	92,5	
28	3	89,2	89,2	56,5	118,5	118,5	85,8	118,5	118,5	56,5	161,8	161,5	99,8
29	4	-	959,9		-	989,2		-	-		-	1032,5	
30	5	959,9	-		989,2	-		989,2	989,2		1032	-	

Продолжение таблицы 6.7

№№ п/п	γ <sub>А,Б</sub>	G <sub>п1</sub>		G <sub>п2</sub>		G <sub>ок</sub>		G <sub>от</sub>		t <sub>вх</sub>	
		т/ч		т/ч		т/ч		т/ч		°С	
		А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
1	1	-	0	-	0	-	1200	-	1200	-	
2	2	0	0	950	0	0	950	0	950	110	
3	3	0	950	950	0	0	0	0	950	110	110
4	4	-	2150	-	0	-	0	-	2150	-	
5	5	0	-	2150	-	0	-	0	-	110	
6	1	0	0	0	0	750	1200	0	450	110	
7	2	0	-	0	-	200	-	550	-	93,08	
8	3	200	-	0	-	0	-	550	-	93,08	110
9	4	750	1200	0	0	0	0	0	450	110	
10	5	750	1400	650	0	0	0	0	650	110	
11	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	2	0	0	2985,7	1785,7	0	1200	0	1200	99,6	99,6
13	3	0	1200	2985,7	1785,7	0	0	0	1200	99,6	
14	4	-	2400	-	1785,7	-	0	-	2400	-	
15	5	0	-	4185,7	-	0	-	0	-	99,6	
16	1	0	0	0	0	1097,6	1200	0	102,5	99,6	
17	2	0	-	0	-	895,1	-	202,4	-	93,37	
18	3	895,1	-	0	-	0	-	202,4	-	93,37	99,6
19	4	1097,6	1200	0	0	0	0	0	102,5	99,6	
20	5	1097,6	2095,1	997,6	0	0	0	0	997,6	99,64	

21	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	2	0	0	43700	42500	0	1200	0	1200	89,2	-	-
23	3	0	1200	43700	42500	0	0	0	1200	89,2	89,2	-
24	4	-	2400	-	42500	-	0	-	2400	-	-	-
25	5	0	-	44900	-	0	-	0	-	89,2	-	-
26	1	0	-	1590,8	-	1200	-	845,4	-	63,19	-	-
27	2	845,4	845,4	745,4	745,4	1200	1200	0	0	89,2	-	-
28	3	2045,4	2045,4	745,4	745,4	0	0	0	0	89,2	89,2	-
29	4	-	3245,4	-	745,4	-	0	-	1200	-	-	-
30	5	2045,4	-	1945,4	-	0	-	0	-	89,2	-	-

Окончание таблицы 6.7

№№ п/п	$\gamma_{A,B}$	$G_p$			$t_{срк}$			$\Delta t_{yx}^{ср}$		$\Delta \eta_{бр}$		$\Delta G_p$	
		т/ч			°С			°С		%		т/ч	
		А	Б	тр	А	Б	тр	А	Б	А	Б	А	Б
1	1	-	250	-	-	131,6	-	-	-4	-	0,02	-	0
2	2	0	0	-	160,9	137,7	-	25,3	2,1	-1,26	-0,1	-250	-250
3	3	0	0	250	160,9	160,9	135,6	25,3	25,3	-1,26	-1,26	-250	-250
4	4	-	1200	-	-	1031,6	-	-	896,0	-	44,8	-	950
5	5	1200	-	-	1031,6	-	-	896,0	-	-44,8	-	950	-
6	1	550	1000	-	123,1	106,6	-	-12,5	-29,0	0,63	1,45	-450	0
7	2	0	-	-	135,3	-	-	-0,37	-	0,018	-	-1000	-
8	3	0	-	1000	144,0	-	135,6	8,36	-	-0,42	-	-1000	-
9	4	550	1000	-	214,1	402,8	-	78,5	267,2	-3,92	-13,4	-450	0
10	5	1200	1200	-	1031,6	1031,6	-	896,0	896,0	-44,8	-44,8	200	200
11	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	2	0	0	0	150,5	121,2	121,2	29,3	0	-1,46	0	0	0
13	3	0	0	-	150,5	150,5	-	29,3	29,3	-1,46	-1,46	0	0
14	4	-	1200	-	-	1021,2	-	-	900	-	-45,0	-	1200

15	5	1200	-		1021,7	-		900	-	-45,0	-	1200	-
16	1	202,5	304,9		87,3	84,7		-19,0	-21,6	0,95	1,08	-102,4	0
17	2	0	-		97,3	-		-9,0	-	0,45	-	-304,9	-
18	3	0	-	304,9	144,3	-	106,2	38,05	-	-1,9	-	-304,9	-
19	4	202,5	304,9		163,9	172,7		57,7	66,5	-2,9	-3,32	-102,4	0
20	5	1200	1200		1022,2	1021,2		916,0	915,0	-45,8	-45,8	895,2	895,1
21	1	-	-		-	-		-	-	-	-	-	-
22	2	0	0		140,1	110,8		29,3	0	-1,46	0	0	0
23	3	0	0	0	140,1	140,1	110,8	29,3	29,3	-1,46	-1,46	0	0
24	4	-	1200		-	1010,8		-	900,6	-	-45,0	-	1200
25	5	1200	-		1010,9	-		900,6	-	45,0	-	1200	-
26	1	0	-		70,8	-		-7,27	-	0,36	-	0	-
27	2	0	0		70,8	-		-7,27	-	0,36	-	0	0
28	3	0	0	0	140,1	140,1	78,1	62,01	62,01	-3,1	-3,1	0	0
29	4	-	1200		-	1010,8		-	932,7	-	-46,6	-	1200
30	5	1200	-		1010,8	-		932,7	-	-46,6	-	1200	-

Таблица 6.8  
 Расчетные параметры режимов работы котла КВГМ-100  
 с каскадной (А,Б) и традиционной (тр) схемами  
 питания в основном режиме

№№ п/п	$G_{\text{тэц}}/G_c$	$t_c$	$t_{\text{тэц}}$	$t_o$	$G_c$	$G_{\text{тэц}}$	$Q_c$	$Q_{\text{тэц}}$	$Q_{\text{кт}}$
	-	$\hat{i} \tilde{N}$	$\hat{i} \tilde{N}$	$\hat{i} \tilde{N}$	т/ч	т/ч	МВт	МВт	МВт
1 ÷ 5	1,0								
6 ÷ 10	0,5	150	70	70	1125	1125 562,5	104,7	0	104,7

11 ÷ 15 16 ÷ 20	1,0 0,5	120,6	59,6	59,6	1475,4	1475,4 737,4	104,7	0	104,7
21 ÷ 25 26 ÷ 30	1,0 0,5	91,2	49,2	49,2	2142,8	2142,8 1071,4	104,7	0	104,7

Продолжение таблицы 6.8

№№ п/п	γ <sub>А,Б</sub>	t <sub>т1</sub>			t <sub>т2</sub>			t <sub>к1</sub>			t <sub>к2</sub>				
		î Ñ			î Ñ			î Ñ			î Ñ				
		А	Б	тр	А	Б	тр	А	Б	тр	А	Б	тр		
1	1	81,3	120,7	78,0	110,6	150	108,5	110,6	81,7	108,5	153,9	125,0	150		
2	2	-	-		-	-		-	-		-	-		-	-
3	3	-	-		-	-		-	-		-	-		-	-
4	4	81,3	940,7		110,6	970		110,6	970		153,9	1013,3			
5	5	940,7	-		970	-		970	-		1013,3	-			
6	1	117,8	120,7	78,0	147,1	150	108,5	111,0	81,7	108,5	154,2	125,0	150		
7	2	-	-		-	-		-	-		-	-		-	-
8	3	-	-		-	-		-	-		-	-		-	-
9	4	165,1	940,7		194,4	970		194,4	970		237,7	1013,3			
10	5	940,7	-		970	-		970	-		1013,3	-			
11	1	-	93,7	59,6	-	123	90,1	-	59,6	90,1	-	102,9	131,6		
12	2	59,6	59,6		88,9	88,9		88,9	84,6		132,2	127,9			
13	3	59,6	59,6		88,9	88,9		88,9	88,9		132,2	132,2			
14	4	-	930,3		-	959,6		-	959,6		-	1003,0			
15	5	930,3	-		959,6	-		959,6	-		1003,0	-			



16	1	87,9	93,7		117,2	123		81,8	59,6		125,1	102,9	
17	2	59,6	-		88,9	-		84,6	-		127,9	-	
18	3	59,6	-		88,9	-		88,9	-		132,2	-	131,6
19	4	114,9	329,6		144,2	358,8		144,2	358,8		187,5	402,1	
20	5	930,3	930,3		959,6	959,6		959,6	959,6		1003,0	1003,0	
21	1	-	61,1		-	90,4		-	49,2		-	92,5	
22	2	49,2	49,2		78,5	78,5		78,5	58,0		121,8	101,2	
23	3	49,2	49,2	49,2	78,5	78,5	79,7	78,5	78,5	79,7	121,8	121,8	121,2
24	4	-	919,9		-	949,2		-	949,2		-	992,5	
25	5	919,9	-		949,2	-		949,2	-		992,5	-	
26	1	57,5	61,1		86,8	90,4		53,2	49,2		96,5	92,5	
27	2	49,2	-		78,5	-		57,9	-		101,2	-	
28	3	49,2	-	49,2	78,5	-	79,7	78,5	-	79,7	121,8	-	121,2
29	4	64,7	76,7		94,0	106,0		94,0	106,0		137,2	149,2	
30	5	919,9	919,9		949,2	949,2		949,2	949,2		992,5	992,5	

Продолжение таблицы 6.8

№№ п/п	γ <sub>А,Б</sub>	G <sub>п1</sub>		G <sub>п2</sub>		G <sub>ок</sub>		G <sub>от</sub>		t <sub>вх</sub>	
		т/ч		т/ч		т/ч		т/ч		î Ñ	
		А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
1	1	0	0	0	0	0	1025	0	1025		
2	2	-	-	-	-	-	-	-	-		
3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	70	70
4	4	0	1025	0	0	0	0	0	0		
5	5	0	-	1025	-	0	-	0	-		
6	1	0	0	0	0	562,5	1025	0	462,5		
7	2	-	-	-	-	-	-	-	-		
8	3	-	-	-	-	-	-	-	-	70	70
9	4	562,5	1025	0	0	0	0	0	462,5		
10	5	562,5	-	462,5	-	0	-	0	-		

11	1	-	0	-	0	-	1200	-	1200		
12	2	0	0	175,4	0	0	175,4	0	175,4		
13	3	0	175,4	175,4	0	0	0	0	175,4	59,6	59,6
14	4	-	1375	-	0	-	0	-	1375,4		
15	5	0	-	1375,4	-	0	-	0	-		
16	1	0	0	0	0	737,7	1200	0	462,3		
17	2	0	-	0	-	175,4	-	562,3	-		
18	3	175,4	-	0	-	0	-	562,3	-	59,6	59,6
19	4	737,7	1200	0	0	0	0	0	462,3		
20	5	737,7	1375,4	637,7	0	0	0	0	637,7		
21	1	-	0	-	0	-	1200	-	1200		
22	2	0	0	842,8	0	0	842,5	0	842,5		
23	3	0	842,8	842,8	0	0	0	0	842,5	49,2	49,2
24	4	-	2042,8	-	0	-	0	-	2042,8		
25	5	0	-	2042,8	-	0	-	0	-		
26	1	0	0	0	0	1071,5	1200	0	128,6		
27	2	0	-	0	-	842,9	-	228,6	-		
28	3	842,8	-	0	-	0	-	228,6	-	49,2	49,2
29	4	1071,4	1200	0	0	0	0	0	128,6		
30	5	1071,4	2042,8	971,4	0	0	0	0	971,4		

Окончание таблицы 6.8

№№ п/п	γ <sub>А,Б</sub>	G <sub>p</sub>			t <sub>срк</sub>			Δt <sub>yx</sub> <sup>ср</sup>		Δη <sub>бp</sub>		ΔG <sub>p</sub>	
		т/ч			î Ñ			î Ñ		%		т/ч	
		А	Б	тр	А	Б	тр	А	Б	А	Б	А	Б
1	1	175	1200	125	132,2	103,3	129,2	3,0	-25,9	-0,15	1,3	50	1075
2	2	-	-		-	-		-	-	-	-	-	-
3	3	-	-		-	-		-	-	-	-	-	-

4	4	175	1200		132,2	991,6		3,0	862,4	-0,15	-43,1	50	1075	
5	5	1200	-		991,6	-		862,4	-	-43,1	-	1075	-	
6	1	737,5	1200	125	132,6	103,3	129,2	3,35	-25,9	-1,68	1,3	612,5	1075	
7	2	-	-		-	-		-	-	-	-	-	-	-
8	3	-	-		-	-		-	-	-	-	-	-	-
9	4	737,5	1200		216,1	991,6		86,8	862,4	-4,34	-43,1	612,5	1075	
10	5	1200	-		991,7	-		862,4	-	-43,1	-	1075	-	
11	1	-	1024,6	0	-	81,2	110,8	-	29,6	-	1,48	-	1024,6	
12	2	0	0		110,5	106,2		-0,3	-4,6	0,016	0,23	0	0	
13	3	0	0		110,5	110,5		-0,3	-0,3	0,016	0,016	0	0	
14	4	-	1200		-	981,2		-	870,4	-	-43,5	-	1200	
15	5	1200	-		981,2	-		870,4	-	-43,5	-	1200	-	
16	1	562,3	1024,6		103,4	81,2		-7,4	-29,6	0,37	1,48	562,3	1024,6	
17	2	0	-		106,2	-		-4,6	-	0,23	-	0	-	
18	3	0	-		110,5	-		-0,3	-	0,016	-	0	-	
19	4	562,3	1024,6		165,8	380,5		55,0	269,6	-2,75	-13,5	562,3	1024,6	
20	5	1200	1200		981,2	981,2		870,4	870,4	-43,5	-43,5	1200	1200	
21	1	-	357,2	0	-	70,8	100,4	-	-29,6	-	1,48	-	375,2	
22	2	0	0		100,1	79,6		-0,3	-20,9	0,016	1,04	0	0	
23	3	0	0		100,1	100,1		-0,3	-0,3	0,016	0,016	0	0	
24	4	-	1200		-	970,8		-	870,4	-	-43,5	-	1200	
25	5	1200	-		970,8	-		870,4	-	-43,5	-	1200	-	
26	1	229	357,2		74,9	70,84		-25,6	-29,6	1,28	1,48	229	357,2	
27	2	0	-		79,6	-		-20,9	-	1,04	-	0	-	
28	3	0	-		100,1	-		-0,3	-	0,016	-	0	-	
29	4	228,6	357,5		115,6	127,6		15,2	27,2	-0,76	-1,36	228,6	357,5	
30	5	1200	1200		970,8	970,8		870,4	870,4	-43,5	-43,5	1200	1200	

где  $t_{Т1}^{\text{доп}}$ ,  $t_{К1}^{\text{доп}}$  предельно-допустимые значения температур воды на входе в секции "Т" и "К" котла, учитывающие условия их работы и вид сжигаемого топлива;  $t_{К2}^{\text{пред}}$  и  $t_{Т2}^{\text{пред}}$  – предельно-максимальные температуры подогрева воды в котле, отвечающие его паспортным данным. В связи с этим рабочие значения расходов  $G_{П1}^P$ ,  $G_{П2}^P$  и температур  $t_{Т2}^P$ , при которых величина  $t_{К2}$  оказывается минимальной согласно ограничениям (6.33), определяются на основании уравнения

$$f(G_{П1}, G_{П2}, t_{Т2}, t_{К2}) = 0. \quad (6.34)$$

В случае КСП-А уравнение (6.34) имеет вид:

$$t_{К2}^2 G_K + t_{Т2}^2 G_T + t_{К2} N_1 + t_{Т2} N_2 + t_{К2} t_{Т2} N_3 + N_4 = 0 \quad (6.35)$$

где

$$\begin{aligned} N_1 &= (G_T - G_C - G_K + G_{П1} + G_{П2})t_0 - G_K A_K, \\ N_2 &= (G_K - G_T - G_C + G_{ТЭЦ} + G_{П1})t_0 - (G_{ТЭЦ} - G_{П2})t_{ТЭЦ} - G_T A_T, \\ N_3 &= G_C - G_K - G_T - G_{П1} - G_{П2}, \\ N_4 &= (G_C t_c - G_{П1} t_0 - G_{П2} t_{ТЭЦ})t_0. \end{aligned}$$

Тогда

$$G_{ок} = G_K \frac{t_{Т2} - t_{К2} + A_K}{t_{Т2} - t_0}. \quad (6.36)$$

В случае КСП-Б уравнение (6.34) представляет собой разность:

$$R^2 - Z^2 = 0, \quad (6.37)$$

где

$$\begin{aligned} R &= (G_T - G_C + G_{П1} + G_{П2})t_{К2} + (G_C - G_{П1} - G_{П2})t_{ТЭЦ} - \\ &\quad - G_T(t_{Т2} - A_T) - 0,5(t_{К2} - t_{ТЭЦ})P_1^{-1}P_2, \\ Z &= (t_{К2} - t_{ТЭЦ}) \left( 0,25 \cdot P_1^{-2}P_2^2 - P_1^{-1}P_3 \right)^{0,5}, \\ P_1 &= t_{Т2} - t_{ТЭЦ}, \\ P_2 &= G_{П1}(t_{Т2} - t_{ТЭЦ}) + (G_C - G_{ТЭЦ})(t_{ТЭЦ} - t_0) - G_K(t_{Т2} - t_{К2} + A_K), \\ P_3 &= -G_{П1}G_K(t_{Т2} - t_{К2} + A_K). \end{aligned}$$

Тогда:

$$G_{ок} = -0,5 \cdot P_2^{-1}P_2 \pm \left( 0,25P_1^{-2}P_2^2 - P_1^{-1}P_3 \right)^{0,5} \geq 0 \quad (6.38)$$

Расчет оптимальных режимов работы котлов требует разработки специальной программы на компьютере. Выполнять его можно двумя способами. Первый способ основывается на использовании данных в таблицах 6.1, 6.5, 6.6 и формул (6.6), (6.7). Руководствуясь основными и дополнительными условиями  $j$ , приведенными в таблице 6.5, определяем предельные значения  $G_{П1}$ ,  $G_{П2}$  и  $G_{ок}$  для каждого из пяти режимов  $\gamma = 1, 2, 3, 4, 5$ . Затем по формулам (6.28) вычисляем основные предельные параметры работы котла в каждом из режимов  $\gamma_{А,Б}$  по схемам КСП-А и КСП-Б. С учетом ограничений (6.33) выбираем

два предельных режима  $\gamma_A$  или  $\gamma_B$  в диапазоне, между которыми располагаются минимально-возможные по условиям эксплуатации (рабочие) значения температур  $t_{к1}^p$  и  $t_{т1}^p$ . Затем по материалам, указанным в таблице 6.6, определяем соответствующие рабочие значения потоков  $G_{п1}^p$ ,  $G_{п2}^p$  либо  $G_{п1,2}^p = G_{п1}^p + G_{п2}^p$ . Этих данных оказывается достаточно для дальнейшего завершения расчетов по формулам (6.36), (6.37), (6.28). Второй способ заключается в использовании и решении уравнений (6.34), руководствуясь ограничениями (6.33).

В таблицах 6.7, 6.8 даны результаты примерных расчетов принципиальной схемы котельной (рис. 6.14) в расчете на один котел КВГМ-100 с КСП-А и КСП-Б. Здесь приведены все пять экстремальных режимов  $\gamma = 1, 2, 3, 4, 5$  работы исследуемой схемы [73]. Причем, два последних из них  $\gamma = 4, 5$  по значениям температур выходят за пределы реальных возможностей, и представляют лишь чисто познавательный интерес. Однако, с точки зрения трансформации теплоты и способа передачи теплоэнергии с высоким температурным потенциалом, режимы  $\gamma = 4$  и  $\gamma = 5$  представляют интерес для множества других технологических процессов в промышленности.

Материалы исследования множества вариантов организации КСП водогрейных котлов свидетельствует о широких возможностях такой модернизации в плане повышения их надежности и экономичности. Кроме того, становится очевидным, что организация КСП водогрейных котлов тесно связана с вопросами оптимизации комплекса теплоснабжения (ТЭЦ – котельные – теплосети – потребитель) [82, 83, 89, 90].

Результаты приведенных исследований положены в основу разработки комплекса программных средств (ВКО1, ВКП1 и др.), позволяющих оптимизировать режим работы водогрейного котла типа КВГМ с модернизированной каскадной схемой питания. Комплекс программных средств выполнен из учёта принципиальной схемы котла и соответствующих потоков воды, как это показано на рис. 6.6, 6.13, 6.14. Решение такой задачи сводится к исследованию разных вариантов распределения разнотемпературных потоков воды по технологическим трубопроводам с целью выявления оптимального, как при работе в базовом, так и в пиковом режимах. Одновременно исследуется два варианта: КСП – А и КСП – Б в сравнении с традиционными схемами работы этих же котлов в основном (ТСП – О) и пиковом (ТСП – П) режимах. Основное различие между вариантами КСП – А и КСП – Б выражается в том, что трубопровод с температурой воды  $t_{от}$  оказывается реверсивным, т. е. направление потока воды в нём меняется по мере переводе котла с режима КСП – А на режим КСП – Б. Кроме того, в режиме КСП – А имеет место равенство:  $t_{от} = t_{ок} = t_o$ . В случае КСП – Б расчёт температуры  $t_{ок}$  усложняется, т.к.  $t_{ок} \geq t_o$ , причём  $t_{от} = t_{тэц}$ .

На рис.6.15а, 6.16а приведены варианты схем организации КСП, а на рис. 6.15б, 6.16б – результаты примерных расчётов (выкопировки из файлов «ВКО1» и «ВКП1») для котла КВГМ – 100. В отличие от схемы на рис. 6.14 на рис. 6.15а, 6.16а предусматривается возможность оптимизации

загрузок насосов рециркуляции путём рационального использования нагре- той воды в экранах топке и в конвективном пучке.

Исходными данными при расчёте КСП котла являются следующие аргументы: температура воды в теплосети ( $t_c, t_o$ ) и на выходе из ТЭЦ ( $t_{ТЭЦ}$ ); тепловая нагрузка котла ( $\Theta_{КТ}$ ); расходы воды по секциям нагрева в топке ( $G_T$ ) и в газоходе ( $G_K$ ); температура воды ( $t_{к1}$ ) на входе в конвективные поверхности нагрева и долевая составляющая (в расчёте на один котёл) расхода воды от ТЭЦ ( $G_{ТЭЦ}$ ) по отношению к расходу воды в тепло- сети ( $G_c$ ), т. е.  $g_{ТЭЦ} = G_{ТЭЦ} / G_c$ .

В случае КСП – А задана температура воды ( $t_{т1}$ ) на входе в по- верхности нагрева, расположенные в топке котла. В результате исходная сис- тема уравнений сводится к зависимости  $G_p = f(G_{п1А}, g_{рп1}, g_{рп2})$ , которая положена в основу решения задачи по варианту КСП – А2. При заданных значениях  $g_{рп1}, g_{рп2}$  задача сводится к решению уравнения  $G_p = f(G_{п1А})$ , положенному в основу решения по варианту КСП – А1.

В случае КСП – Б исходная система уравнений сводится к зависи- мости  $G_p = f(G_{п1А}, t_{т1}, g_{рп1}, g_{рп2})$ , которая положена в основу решения задачи по варианту КСП – Б2. При заданных значениях  $g_{рп1}, g_{рп2}$  задача

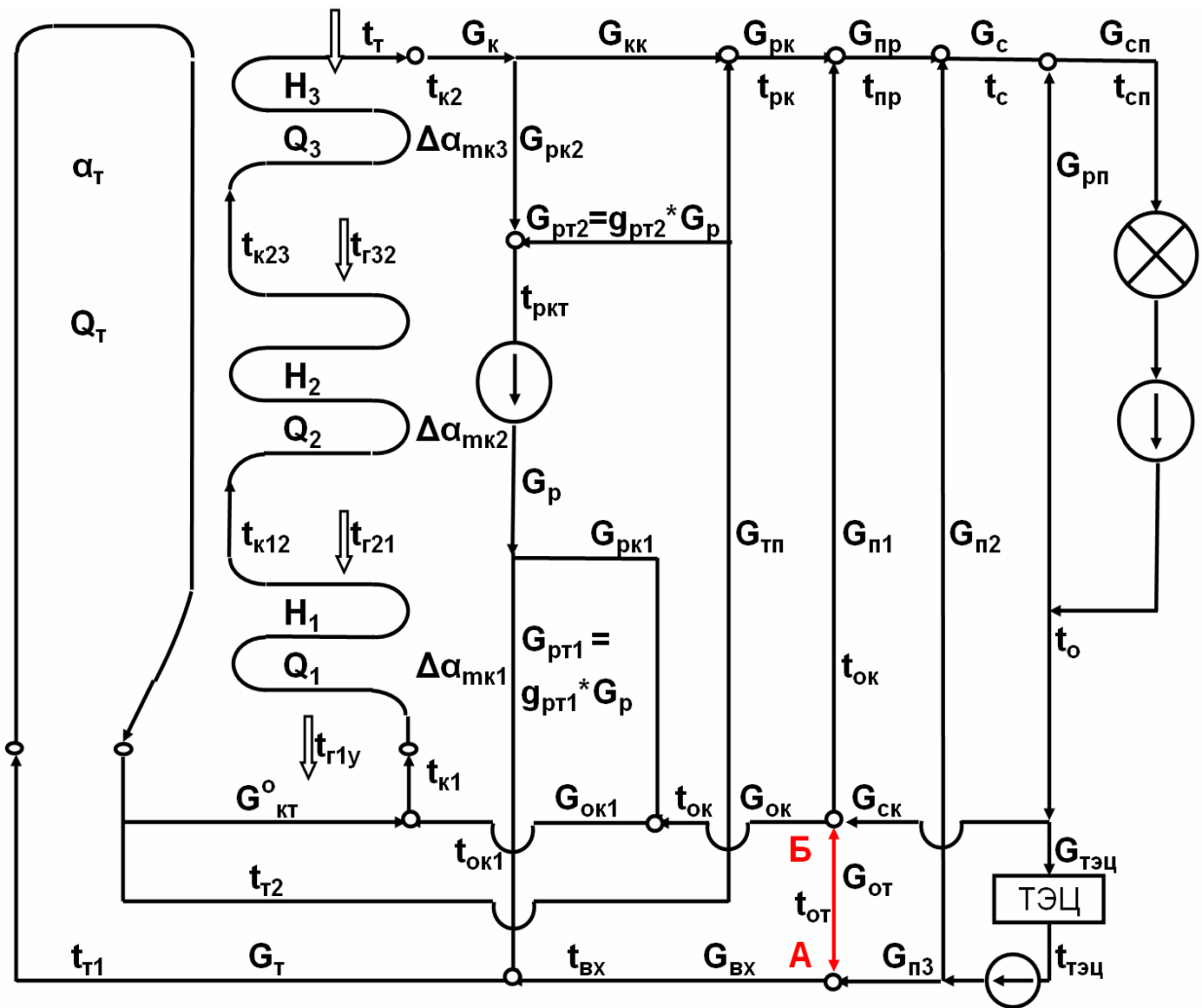


Рис. 6.15а. Фрагмент из файла «ВКО1».

ВКО1 Сводные показатели режимов работы водогрейного котла типа КВГМ с каскадной (КСП А, КСП - Б) и с традиционной (в основном режиме, ТСП - О) схемами питания. Топливо - газ.

Обозн.	$G_{тэц}$	$t_c$	$t_{тэц}$	$t_o$	$\Theta_{кт} * 10^{-6}$	$t_{к1}$	$G_t$	$G_k$	$t_{к2}$	$G_c$
КСП - А1	0,50	110,0	90,0	55,0	90,00	70,0	1300,0	1200,0	104,3	2400,0
КСП - А2										
КСП - Б1	0,50	110,0	90,0	55,0	90,00	60,0	1300,0	1200,0	94,4	2400,0
КСП - Б2										
ТСП - О	-	110,0	-	55,0	90,0	107,9	1300,0	1300,0	139,2	1636,4
Размерн.	-	град	град	град	Гкал/ч	град	т/ч	т/ч	град	т/ч

Обозн.	$G_{тэц}$	$\Theta_{с1} * 10^{-6}$	$\Theta_{тэц} * 10^{-6}$	$(\Theta_t)_{гор} * 10^{-6}$	$(\Theta_k)_{ист} * 10^{-6}$	$B_p$	$t_t$	$\eta_{бр}$	$t_{ты}$	$b_{бр}$
КСП - А1	1200,0	132,00	42,00	48,82	41,18	11401,3	1095,5	0,926	142,0	154,30
КСП - А2										
КСП - Б1	1200,0	132,00	42,00	48,69	41,31	0,0	1093,9	0,930	133,0	153,59
КСП - Б2										
ТСП - О	-	90,00	-	49,31	40,69	11604,5	1101,8	0,910	176,0	157,05
Размерн.	т/ч	Гкал/ч	Гкал/ч	Гкал/ч	Гкал/ч	кг/ч	град	-	град	кг/Гкал

Знач. показат.	$G_p$	$G_{п1}$	$t_{т1}$	$t_{т2}$	$G_{рк1}$	$G_{рк2}$	$G_{кк}$	$G_{рк}$	$G_{тп}$	
КСП - А	min А1	689,0	240,2	100,0	137,6	68,9	551,2	648,8	1639,7	1128,7
	min А2	401,9	43,5			0,0	0,0	1200,0	1880,1	1082,0
КСП - А	max А1	1161,4	0,7			116,1	929,1	270,9	1199,3	1160,7
	max А2	401,9	43,5			0,0	0,0	1200,0	1880,1	1082,0
КСП - Б	min Б1	100,0	81,7	90,99	128,4	0,0	75,0	1125,0	2318,3	1218,3
	min Б2	1428,8	128,8	101,57	139,0	128,8	1200,0	0,0	1071,2	1300,0
КСП - Б	max Б1	1300,0	162,8	106,91	144,4	0,0	975,0	225,0	1183,1	1283,1
	max Б2	1428,8	128,8	101,57	139,0	128,8	1200,0	0,0	1071,2	1300,0
ТСП - О		231,5	567,9	70,0	107,9	-	-	-	-	-
Размерность		т/ч	т/ч	град	град	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч

Знач. показат.	$G_{пр}$	$G_{п2}$	$G_{п3}$	$G_{от}$	$G_{ок}$	$G_{ок1}$	$G_{вх}$	$G_{кт}^o$	$t_{ок}$	
КСП - А	min А1	1879,9	520,1	679,9	0,0	959,8	1028,7	679,9	171,3	55,0
	min А2	1923,6	476,4	723,6	174,5	982,0	982,0	898,1	218,0	55,0
КСП - А	max А1	1200,0	1200,0	0,0	254,7	944,6	1060,7	254,7	139,3	55,0
	max А2	1923,6	476,4	723,6	174,5	982,0	982,0	898,1	218,0	55,0
КСП - Б	min Б1	2400,0	0,0	1200,0	0,0	1118,3	1118,3	1200,0	81,7	55,0
	min Б2	1200,0	1200,0	0,0	0,0	1071,2	1200,0	0,0	0,0	55,0
КСП - Б	max Б1	1345,9	1054,1	145,9	145,9	1183,1	1183,1	0,0	16,9	58,8
	max Б2	1200,0	1200,0	0,0	0,0	1071,2	1200,0	0,0	0,0	55,0
ТСП - О		1068,5	-	-	-	-	-	1068,5	-	-
Размерность		т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	град

Знач. показат.	$G_{рт1}$	$G_{рт2}$	$G_{рт1}$	$G_{рт2}$	$t_{ок1}$	$t_{вх}$	$t_{рк}$	$t_{пр}$	$t_{ркт}$	
КСП - А	min А1	0,900	0,200	620,1	137,8	58,7	90,0	124,4	115,5	111,0
	min А2	1,000	1,000	401,9	401,8	55,0	83,2	116,3	115,0	137,5
КСП - А	max А1	0,900	0,200	1045,3	232,3	61,1	55,0	130,0	130,0	111,0
	max А2	1,000	1,000	401,9	401,8	55,0	83,2	116,3	115,0	137,5
КСП - Б	min Б1	1,000	0,250	100,0	25,0	55,0	90,0	111,9	110,0	102,9
	min Б2	0,910	0,160	1300,0	228,8	60,0	90,0	139,0	130,0	101,6
КСП - Б	max Б1	1,000	0,250	1300,0	325,0	58,8	90,0	134,9	125,7	106,9
	max Б2	0,910	0,160	1300,0	228,8	60,0	90,0	139,0	130,0	101,6
ТСП - О		-	-	-	-	-	55,0	-	139,2	-
Размерность		-	-	т/ч	т/ч	град	град	град	град	град

Рис. 6.156. Фрагмент из файла «ВКО1».

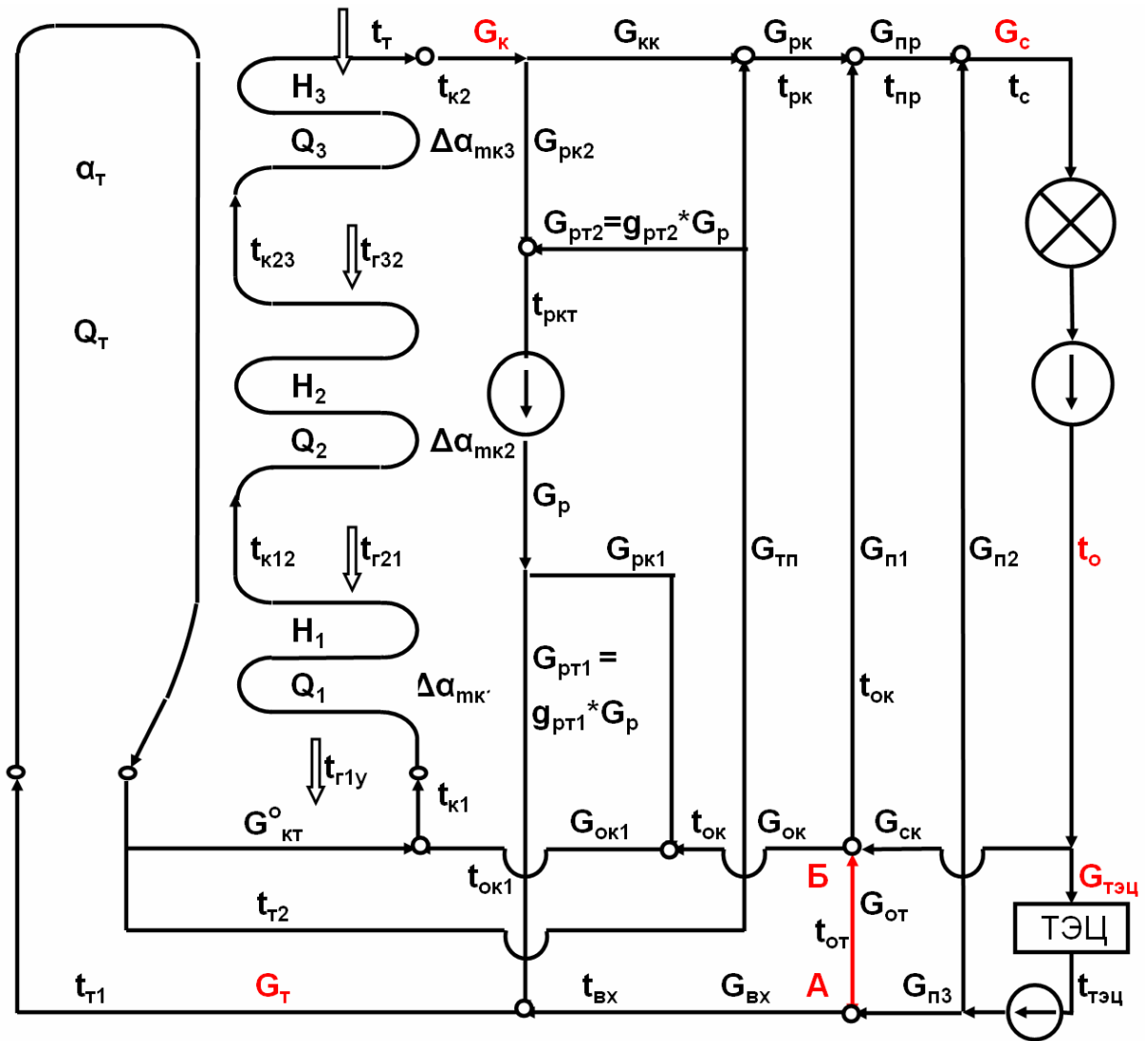


Рис. 6.16а. Фрагмент из файла «ВКП1».

сводится к решению уравнения  $G_p = f(G_{п1A}, t_{т1})$ , положенному в основу решения задачи по варианту КСП – Б1.

Эффективность организации КСП котла в данных примерах определяется по величине снижения температуры уходящих газов  $\Delta t_{yx}$ , влияющих на КПД брутто котла:  $\Delta \eta_{бр} = K_{yx} \Delta t_{yx}$ , %, где в случае сжигания газа  $K_{yx} = -0,05$  %/град, мазута –  $K_{yx} = -0,047$  %/град.

Экономия топлива за счёт снижения температуры уходящих газов:  $\Delta V = \Delta \eta_{бр} V_{тр} / \eta_{бртр}$ , м<sup>3</sup>/час, т/час, тут/час, где  $V_{тр}$ ,  $\eta_{бртр}$  – расход топлива и КПД брутто котла до модернизации.

Срок окупаемости работ по организации КСП с достаточной степенью точности определяем так:  $T = C_{мд} / C_{эф}$ , лет, где  $C_{мд}$  – суммарные затраты на модернизацию котла и схемы обвязки трубопроводов в котельной, т.е оплата исследовательских, проектно-конструкторских, монтажно-наладочных работ, стоимости труб, арматуры и прочие денежные затраты;  $C_{эф}$  – годовой экономический эффект от внедрения КСП в виде денежных средств:  $C_{эф} = (\Delta B \Pi_T - \Delta N \Pi_э) \tau$ , где  $\Delta N$  – дополнительные затраты энергии на привод сетевых и рециркуляционных насосов;  $\Pi_T$  и  $\Pi_э$  – цены



ВКО1

Сводные показатели режимов работы водогрейного котла типа КВГМ с каскадной

(КСП А, КСП - Б) и с традиционной (в основном режиме, ТСП - О) схемами питания. Топливо - газ.

Обозн.	$G_{ТЭЦ}$	$t_c$	$t_{ТЭЦ}$	$t_o$	$Q_{КТ} * 10^{-6}$	$t_{К1}$	$G_T$	$G_K$	$t_{K2}$	$G_c$
КСП - А1	0,50	110,0	90,0	55,0	90,00	70,0	1300,0	1200,0	104,3	2400,0
КСП - А2										
КСП - Б1	0,50	110,0	90,0	55,0	90,00	60,0	1300,0	1200,0	94,4	2400,0
КСП - Б2										
ТСП - О	-	110,0	-	55,0	90,0	107,9	1300,0	1300,0	139,2	1636,4
Размерн.	-	град	град	град	Гкал/ч	град	т/ч	т/ч	град	т/ч

Обозн.	$G_{ТЭЦ}$	$Q_{ci} * 10^{-6}$	$Q_{ТЭЦ} * 10^{-6}$	$(Q_{ТЭЦ})_{ТОГ} * 10^{-6}$	$(Q_{К})_{ИСТ} * 10^{-6}$	$B_p$	$t_T$	$\eta_{OP}$	$t_{r1y}$	$b_{OP}$
КСП - А1	1200,0	132,00	42,00	48,82	41,18	11401,3	1095,5	0,926	142,0	154,30
КСП - А2										
КСП - Б1	1200,0	132,00	42,00	48,69	41,31	0,0	1093,9	0,930	133,0	153,59
КСП - Б2										
ТСП - О	-	90,00	-	49,31	40,69	11604,5	1101,8	0,910	176,0	157,05
Размерн.	т/ч	Гкал/ч	Гкал/ч	Гкал/ч	Гкал/ч	кг/ч	град	-	град	кг/Гкал

Знач. показат.	$G_p$	$G_{п1}$	$t_{r1}$	$t_{r2}$	$G_{PK1}$	$G_{PK2}$	$G_{KK}$	$G_{PK}$	$G_{TP}$	
КСП - А	min А1	689,0	240,2	100,0	137,6	68,9	551,2	648,8	1639,7	1128,7
	min А2	401,9	43,5			0,0	0,0	1200,0	1880,1	1082,0
КСП - А	max А1	1161,4	0,7			116,1	929,1	270,9	1199,3	1160,7
	max А2	401,9	43,5			0,0	0,0	1200,0	1880,1	1082,0
КСП - Б	min Б1	100,0	81,7	90,99	128,4	0,0	75,0	1125,0	2318,3	1218,3
	min Б2	1428,8	128,8	101,57	139,0	128,8	1200,0	0,0	1071,2	1300,0
КСП - Б	max Б1	1300,0	162,8	106,91	144,4	0,0	975,0	225,0	1183,1	1283,1
	max Б2	1428,8	128,8	101,57	139,0	128,8	1200,0	0,0	1071,2	1300,0
ТСП - О		231,5	567,9	70,0	107,9	-	-	-	-	-
Размерность		т/ч	т/ч	град	град	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч

Знач. показат.	$G_{np}$	$G_{п2}$	$G_{п3}$	$G_{от}$	$G_{ок}$	$G_{ок1}$	$G_{вх}$	$G_{кт}$	$t_{ок}$	
КСП - А	min А1	1879,9	520,1	679,9	0,0	959,8	1028,7	679,9	171,3	55,0
	min А2	1923,6	476,4	723,6	174,5	982,0	982,0	898,1	218,0	55,0
КСП - А	max А1	1200,0	1200,0	0,0	254,7	944,6	1060,7	254,7	139,3	55,0
	max А2	1923,6	476,4	723,6	174,5	982,0	982,0	898,1	218,0	55,0
КСП - Б	min Б1	2400,0	0,0	1200,0	0,0	1118,3	1118,3	1200,0	81,7	55,0
	min Б2	1200,0	1200,0	0,0	0,0	1071,2	1200,0	0,0	0,0	55,0
КСП - Б	max Б1	1345,9	1054,1	145,9	145,9	1183,1	1183,1	0,0	16,9	58,8
	max Б2	1200,0	1200,0	0,0	0,0	1071,2	1200,0	0,0	0,0	55,0
ТСП - О		1068,5	-	-	-	-	-	1068,5	-	-
Размерность		т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	т/ч	град

Знач. показат.	$G_{PT1}$	$G_{PT2}$	$G_{PT1}$	$G_{PT2}$	$t_{ок1}$	$t_{вх}$	$t_{PK}$	$t_{np}$	$t_{PKT}$	
КСП - А	min А1	0,900	0,200	620,1	137,8	58,7	90,0	124,4	115,5	111,0
	min А2	1,000	1,000	401,9	401,8	55,0	83,2	116,3	115,0	137,5
КСП - А	max А1	0,900	0,200	1045,3	232,3	61,1	55,0	130,0	130,0	111,0
	max А2	1,000	1,000	401,9	401,8	55,0	83,2	116,3	115,0	137,5
КСП - Б	min Б1	1,000	0,250	100,0	25,0	55,0	90,0	111,9	110,0	102,9
	min Б2	0,910	0,160	1300,0	228,8	60,0	90,0	139,0	130,0	101,6
КСП - Б	max Б1	1,000	0,250	1300,0	325,0	58,8	90,0	134,9	125,7	106,9
	max Б2	0,910	0,160	1300,0	228,8	60,0	90,0	139,0	130,0	101,6
ТСП - О		-	-	-	-	-	55,0	-	139,2	-
Размерность		-	-	т/ч	т/ч	град	град	град	град	град

Рис. 6.166. Фрагмент из файла «ВКП1».

на топливо и электроэнергию;  $\tau$  – длительность рабочей кампании котла в течение года.

Результаты расчётов, выполняемых с помощью упомянутых программных средств, свидетельствуют об экономической выгоде организации КСП. Используемый таким образом резерв по снижению температуры уходящих газов позволяет снизить удельный расход топлива на величину от 1 до 6 кг / Гкал, что для постоянно действующих теплоисточников является ощутимым экономическим эффектом. Срок окупаемости такого мероприятия в плане модернизации котла составляет порядка 1 – го года.

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

1. Рассмотрены варианты организации каскадной схемы питания водогрейных котлов.

2. Разработан и выполнен с помощью специально разработанных программных средств примерный анализ массовых и тепловых потоков в водогрейной котельной с 2-х секционной каскадной схемой питания котлов.

3. Приведенные результаты примерных расчётов котла КВГМ-100 подтверждают эффективность организации КСП в сравнении с традиционными схемами питания в основном и пиковом режимах.

4. Каскадная схема питания котла позволяет загружать его в пиковом, базовом и соответственно промежуточных режимах по мере необходимости в оперативном порядке без дополнительных переделок в схеме циркуляции.

5. Организация каскадной схемы питания облегчает задачу оптимизации режима котельной в целом из учета загрузки насосов рециркуляции, а также повышения надежности и экономичности работы котлов.

6. Разработана методика инженерных расчетов КСП, позволяющая также создать специальную программу для ЭВМ с учётом конкретных условий эксплуатации по оптимизации режимов работы котлов с каскадной схемой питания.