

## ГЛАВА 5. ОСНОВЫ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЕЛЬНЫХ.

### 5.1. Постановка вопроса.

Традиционная (рис.5.1) тепловая схема водогрейной котельной [59] предусматривает параллельную работу котлов на общую теплосеть. Одна и та же циркуляция воды в сети и отпуск теплоты могут обеспечиваться разным числом котлов, что позволяет оптимизировать режим работы котельной по распределению нагрузок между котлами.

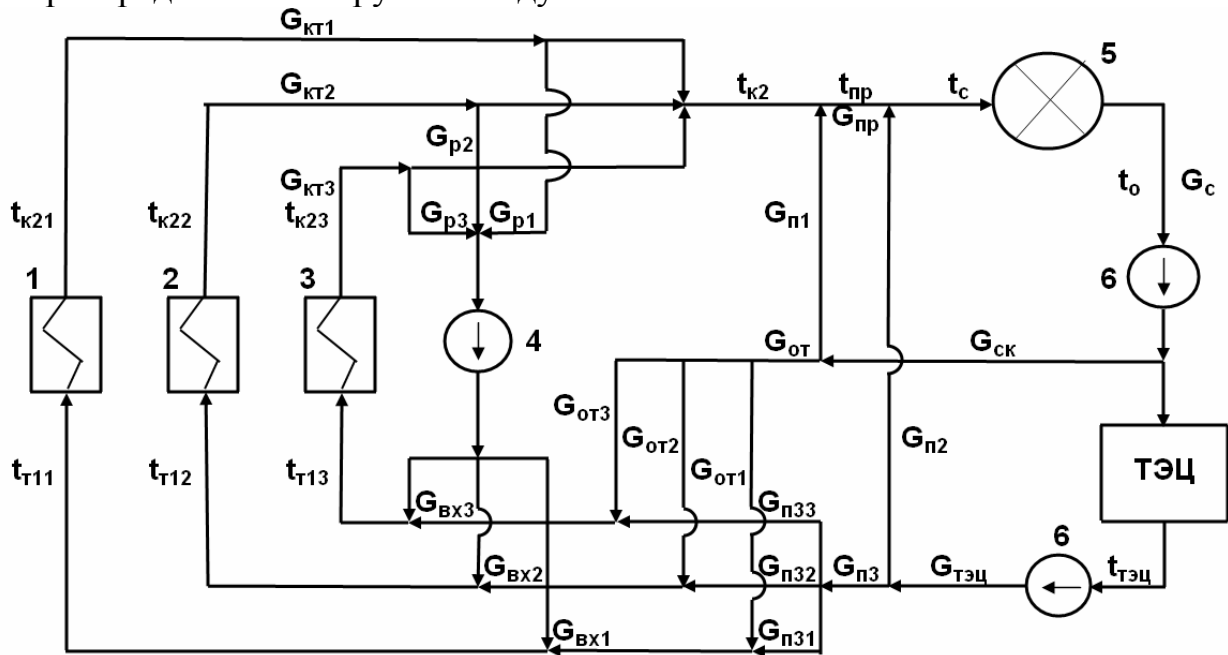


Рис. 5.1. Принципиальная схема пиковой котельной с тремя водогрейными котлами. 1, 2, 3 – водогрейные котлы; 4 – насос рециркуляции; 4 – потребитель; 6 – сетевые насосы.

При стационарном режиме работы котельной расходы и температуры воды в сети, от ТЭЦ [69] и через котлы, как правило, постоянны. Остальные показатели  $\Pi_i$  любого котла и котельной в целом (температуры воды на входе и выходе из котла, потоки рециркуляции и др.) могут быть выражены как функции двух независимых переменных [70]:

$$\Pi_i = f_i(G_{\text{п}1i}, G_{\text{п}2i}), \quad (5.1)$$

где  $G_{\text{п}1i}$  и  $G_{\text{п}2i}$  - массовые потоки обратной сетевой воды (в расчете на один  $i$ -ый котел) с температурой  $t_o$  и после бойлеров ТЭЦ с температурой  $t_{\text{тэц}}$ , подмешиваемые в прямой трубопровод, минуя котлы.

Величина  $G_{\text{п}2} = \sum_{i=1}^k G_{\text{п}2i}$ , входящая в уравнения (5.1), характерна только для

случая работы котла в пиковом режиме. В базовом режиме величина потока  $G_{\text{п}2}$  не оказывает влияние на тепловой баланс теплосети, т. к. имеет ту же температуру  $t_{\text{тэц}} = t_o$ , равную температуре потока  $G_{\text{п}1i}$ . Поэтому, в случае базового режима работы котельной, уравнение (5.1) теряет свои оптимизационные качества и обращается в однозначную функцию с одной переменной,

т.е.  $P_i = f_i(G_{пi})$ . Оптимизация режима работы котельной в этом случае сводится только решению задачи оптимального распределения нагрузок между котлами.

В пиковом режиме система уравнений (5.1) позволяет вычислять оптимальные значения потоков воды в пределах котельной и их температуры. Задача дополнительной оптимизации нагрузок в этом случае существенно усложняет решение основной – по оптимизации температур. Очевидно, что в связи с этим требуется разработка универсального метода решения этой задачи, пригодного как для пиковой, так и для базовой котельной.

Решение задач оптимизации режимов работы котельной основано, прежде всего, на унификации ее тепловой схемы. Это позволяет в широком масштабе осуществить актуальные тенденции к повышению её надежности и экономичности, включая котлы. В отношении последних, исходя из опыта эксплуатации, основные тенденции к повышению их эффективности можно сформулировать так:

1. Нагрузка котла должна быть как можно большей.
2. Температура уходящих газов должна быть как можно меньшей.
3. Температура воды на входе в котел должна быть как можно большей.
4. Разрыв между температурами воды в прямой магистрали и на выходе из котла должен быть как можно меньшим.
5. Минимальная температура труб конвективного пучка должна быть выше температуры точки росы на 5-7 °С.

Очевидно, что некоторые из приведенных принципов в какой-то мере противоречат друг другу. Именно это обстоятельство и учтено в основе оптимизации этих принципов путем введения ряда мероприятий режимного характера, а также путем усовершенствования конструкции котлов в целом.

### **5.2. Особенности температурных режимов работы поверхностей нагрева водогрейных котлов.**

Известное отличие между процессами теплообмена в топке и газоходе котла в существенной мере влияет на степень охлаждения рабочих газов в этих зонах. В топке величина удельного теплового потока  $q_T$  на лучевоспринимающие поверхности  $H_L$  экрана определяется в основном законами излучения и с помощью коэффициента пропорциональности  $\chi$  её можно выразить так:

$$q_T = \chi(T_a^4 - T_{сэ}^4), \quad (5.2)$$

где  $T_a = t_a + 273$  и  $T_{сэ} = t_{сэ} + 273$  – теоретическая температура горения и температура стенок экрана.

В газоходе котла аналогичная теплоотдача  $q_K$  определяется в основном конвекцией и её можно определить формулой Ньютона:

$$q_K = \alpha_K(t_T - t_{сK}), \quad (5.3)$$

где  $t_{\Gamma}$  и  $t_{\text{СК}}$  – температура рабочих газов и омываемой ими конвективной поверхности нагрева, т. е. наружной поверхности труб;  $\alpha_{\text{К}}$  – коэффициент теплообмена от газов к стенке.

На рис. 5.2 представлены результаты измерений, выполненные Белэнергоремналадкой \* на котле №2 ПТВМ-100 Минской ТЭЦ-2. Термопары были установлены на трубах конвективного пучка в центре топки за исключением одного змеевика (кривая 10, рис. 5.2), расположенного на потолке. Кривые 2, 8 и 4, 7 характеризуют температурный режим стали одной экранной трубы и одного змеевика в конвективном пучке. Опыты выполнялись после очистки поверхностей нагрева снаружи и изнутри. При этом на внутренних стенках труб были остаточные отложения солей: в экранах  $50-100 \text{ г/м}^2$ , в змеевиках пучка –  $10-15 \text{ г/м}^2$ .

\*См.: «Отчёт по испытаниям котла ПТВМ-100 на подкислённой воде с определением температурного состояния поверхностей нагрева» Инв. №2117. Белэнергоремналадка, г.Минск, 1976г. Данные на рис 5.2 приведены на основании материалов этого отчёта с любезного согласия гл. инженера Белэнергоремналадки (Исх. №16/1722 от 22.06.89г.).

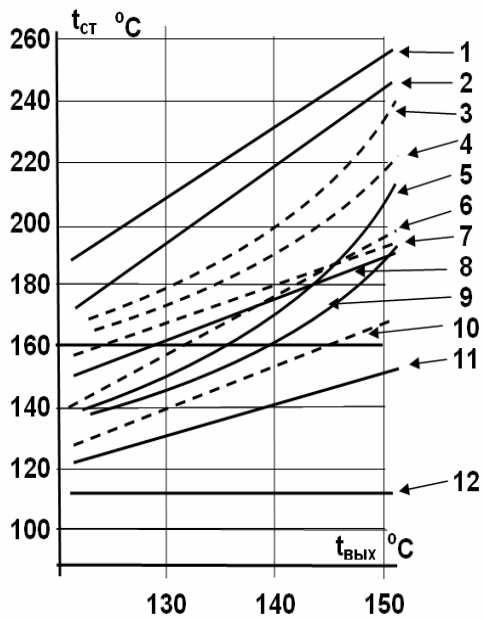


Рис. 5.2. Температура труб экранов и конвективного пучка со стороны топки в зависимости от уровня подогрева воды в котле ПТВМ-100, включённом по 2-х ходовой схеме циркуляции. 1, 2 и 3, 4 – температуры экранных труб и конвективного пучка снаружи; 5, 8, 9 и 6, 7, 10 – то же изнутри; 11, 12 – температура воды на выходе и входе в котёл.

Измерения, выполненные Белэнергоремналадкой, позволяют утверждать, что в нормальных условиях эксплуатации температура наружной стенки труб конвективного пучка, обращенных к топке, как правило, на  $30-70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  выше температуры протекающей в них среды. Теплообмен в трубах конвективного

пучка, кстати, также и в экранах топки, сопровождается кипением воды в пристеночном пограничном слое. Сделанные выводы подтверждаются также более поздними исследованиями ВТИ [71], выполненными на котлах ПТВМ-50 и ПТВМ-180.

С теоретической точки зрения процесс теплообмена в конвективных и экранных поверхностях нагрева котла во многом схож с аналогичными процессами теплообмена при нагревании потока жидкости в трубе набегающим потоком воздуха или газа, способного излучать тепловую энергию. Поэтому в целях более детального представления о количественных значениях показателей, характеризующих процессы теплообмена в поверхностях котла, рас-

смотрим аналогичный случай теплообмена при нагревании потока жидкости в трубе набегающим потоком газа.

Согласно закону Фурье перепады температур по сечению обогреваемой трубы с потоком рабочей жидкости запишем так:

$$t_{\text{вн}} - t_{\text{ж}} = q_1 R_{\text{вн}}, \quad (5.4)$$

$$t_{\text{нар}} - t_{\text{вн}} = q_1 R_1, \quad (5.5)$$

$$t_{\text{ок}} - t_{\text{нар}} = q_1 R_{\text{ок}}, \quad (5.6)$$

где

$$R_{\text{вн}} = (\pi d_{\text{вн}} \alpha_{\text{вн}})^{-1}, \quad (5.7)$$

$$R_1 = (2\pi \lambda_1)^{-1} \ln(d_{\text{нар}} / d_{\text{вн}}), \quad (5.8)$$

$$R_{\text{ок}} = (\pi d_{\text{нар}} \alpha_{\text{ок}})^{-1}, \quad (5.9)$$

В формулах (5.4) – (5.9)  $d_{\text{вн}}$ ,  $d_{\text{нар}}$  – внутренний и наружный диаметры труб;  $t_{\text{ж}}$ ,  $t_{\text{вн}}$ ,  $t_{\text{нар}}$ ,  $t_{\text{ок}}$  – температуры потенциального ядра жидкости, внутренней и наружной стенок трубы и окружающей среды;  $q_1$  – линейная плотность стационарного теплового потока в радиальном направлении трубы;  $R_{\text{вн}}$ ,  $R_{\text{ок}}$  – тепловые сопротивления пограничных слоёв с внутренней и наружной стенок трубы;  $R_1$  – сопротивление стенки трубы;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности стенки трубы;  $\alpha_{\text{вн}}$ ,  $\alpha_{\text{ок}}$  – коэффициенты теплообмена с внутренней и наружной стенок труб. В свою очередь  $\lambda_1$  определяется линейной зависимостью [53] от температуры потока:

$$\lambda_1 = \lambda_1^0 (1 + \beta_1 t_{\text{ж}}), \quad (5.10)$$

а коэффициенты теплообмена  $\alpha_{\text{вн}}$ ,  $\alpha_{\text{ок}}$  вычисляются на основании зависимостей [53]:

$$\text{Nu} = \alpha_{\text{вн}} d_{\text{вн}} / \lambda_{\text{ж}} = 0,021 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,8} \text{Pr}_{\text{ж}} / \text{Pr}_{\text{с}})^{0,25}, \quad (5.11)$$

$$\text{Re}_{\text{ж}} = w_1 d_{\text{вн}} / \nu_{\text{ж}}, \quad (5.12)$$

где согласно [69]

$$\alpha_{\text{ок}} = 11,7 + 7 W_{\text{воз}}^{0,5}. \quad (5.13)$$

На основании (5.11), вводя коэффициент динамической вязкости через посредство его виртуального значения, как  $\nu_{\text{ж}} = g \mu_{\text{ж}}^{-1}$ , на основании (5.11), (5.12) определяем:

$$\alpha_{\text{вн}} 0,021 d_{\text{вн}}^{-0,2} [w_1 g^{-1} \mu_{\text{ж}}^{-1} \rho_{\text{ж}}]^{0,8} \lambda_{\text{ж}} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} (\text{Pr}_{\text{ж}} / \text{Pr}_{\text{с}})^{0,25}, \quad (5.14)$$

где показатели  $\mu_{\text{ж}}(t_{\text{ж}})$ ,  $\lambda_{\text{ж}}(t_{\text{ж}})$ ,  $\text{Pr}_{\text{ж}}(t_{\text{ж}})$ ,  $\text{Pr}_{\text{с}}(t_{\text{вн}})$  вычисляются на основании аппроксимационных функций типа полиномов:  $Y_i = A_6 X^6 + A_5 X^5 + A_4 X^4 + A_3 X^3 + A_2 X^2 + A_1 X + A_0$ .

В результате совместного решения (5.4) – (5.6) получаем уравнение, позволяющее вычислить температуру внутренней стенки в зависимости от температуры потенциального потока жидкости  $t_{ж}$ :

$$t_{вн} = \frac{t_{ок} + t_{ж}(R_1 + R_{ок})R_{вн}^{-1}}{1 + (R_1 + R_{ок})R_{вн}^{-1}}. \quad (5.15)$$

Здесь следует заметить, что уравнение (5.15) не является явной функцией от аргумента  $t_{ж}$ . Это определяется входящей в него величиной  $R_{вн}(t_{вн})$  через посредство зависимости  $Pr_c = f(t_{вн})$ , определяемой формулами (5.7) и (5.14). И только лишь в случае пренебрежения отношением  $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}$ , входящим в формулу (5.14), т. е. путём принятия комплекса  $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} = 1$ , уравнение (5.15) становится явной функцией от аргумента  $t_{ж}$ . Ввиду того, что перепад температуры  $\Delta t_{ж/вн}$  по толщине пограничного слоя в трубе весьма не велик, применительно к данной задаче это пренебрежение сводится к  $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} = 1,003 \div 1,005$   $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \approx 1$ , т. е. к не существенному изменению коэффициента теплообмена  $\alpha_{вн}$ , а следовательно и к не существенному влиянию на достоверность расчёта. Тем не менее при численном решении уравнения (5.15) пренебрегать комплексом  $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}$  нет необходимости, определяя поиск не явной зависимости  $t_{вн} = f(t_{ж})$  путём использования специальных функций в компьютере под наименованием «подбор параметра» или «поиск решения». Вычислив таким образом температуру  $t_{вн}$ , линейную плотность теплового потока  $q_1$  определяем на основании формулы (5.4) так:  $q_1 = (t_{вн} - t_{ж})R_{вн}^{-1}$ . Далее вычисляется температура наружной стенки трубы [53]:

$$t_{нар} = -\beta_1 + \left( (\beta_1^{-1} + t_{вн})^2 - \frac{q_1 \ln(d_{нар}/d_{вн})}{\pi \lambda_1^0 \beta_1} \right)^{0,5}; \quad (5.16)$$

в случае  $\beta_1 = 0$

$$t_{нар} = t_{вн} - \frac{q_1 \ln(d_{нар}/d_{вн})}{2\pi \lambda_1^0}. \quad (5.17)$$

Рассмотрим аналогичную задачу при сложном теплообмене, когда наружная поверхность трубы наряду с конвекцией подвергается одновременному воздействию излучения со стороны окружающей среды. Механизм передачи теплоты от наружной стенки трубы к потенциальному потоку внутри неё остаётся прежним, как в случае только одной конвективной составляющей. Возрастает лишь линейная плотность суммарного  $q_{\Sigma 1}$  теплового потока за счёт лучистого теплообмена, т. е.

$$q_{\Sigma 1} = q_1^k + q_1^l, \quad (5.18)$$

где  $q_1^K$  и  $q_1^L$  – линейные плотности тепловых потоков за счёт конвекции и излучения.

Согласно законам излучения показатель  $q_1^L$  выразим так:

$$q_1^L = q_s^L \pi d_{\text{нар}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \pi d_{\text{нар}} 10^8 (T_{\text{ок}}^4 - T_{\text{нар}}^4), \quad (5.19)$$

где  $q_s^L$  – плотность теплового потока на единицу поверхности наружной стенки трубы от излучения окружающей среды;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты рабочей среды и стенки трубы; применительно к топкам котлов  $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,2 - 0,4$ ;  $C_0 = 5,768 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{К})$  – излучательная способность абсолютно чёрного тела;  $T_{\text{ок}} = t_{\text{ок}} + 273$ ,  $T_{\text{нар}} = t_{\text{нар}} + 273$ .

Величину плотности теплового потока на единицу поверхности наружной стенки трубы определим по формуле Ньютона:

$$q_s^K = q_1^K (\pi d_{\text{нар}})^{-1} = \alpha_{\text{ок}} (t_{\text{ок}} - t_{\text{нар}}). \quad (5.20)$$

На основании (5.16) – (5.18) получаем расчётную формулу по определению суммарного линейного теплового потока  $q_{\Sigma 1}$ , поступающего через стенку трубы:

$$q_{\Sigma 1} = [\alpha_{\text{ок}} (t_{\text{ок}} - t_{\text{нар}}) + \varepsilon_{\text{пр}} C_0 10^8 (T_{\text{ок}}^4 - T_{\text{нар}}^4)] \pi d_{\text{нар}}. \quad (5.21)$$

Температура  $T_{\text{нар}} = t_{\text{нар}} + 273$ , входящая в уравнение (5.21), вычисляется по формулам (5.16), (5.17) при  $q_1 = q_{\Sigma 1}$ .

Из анализа формул (5.14) – (5.21) следует, что в случае сложного теплообмена уравнение (5.15) не может быть использовано в качестве поиска (путём «подбора параметра») температуры  $t_{\text{вн}}$  даже в случае принятия комплекса  $(Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{с}})^{0,25} = 1$ . Это объясняется цепью последующих вычислений показателей  $R_{\text{вн}}$ ,  $\alpha_{\text{вн}}$  и  $q_{\Sigma 1} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{ж}}) R_{\text{вн}}^{-1} = f(t_{\text{нар}})$  по формулам (5.4), (5.14) и (5.18) – (5.21), приводящим к «циклической ссылке» в процессе поиска температуры  $t_{\text{вн}}$ . Поэтому в данном случае поиск температур  $t_{\text{вн}}$  и  $t_{\text{нар}}$  необходимо выполнять на основании совместного решения системы уравнений: (5.15) и (5.16), имея в виду, что показатель  $q_{\Sigma 1}$  вычисляется по формуле (5.21). В случае пренебрежения комплексом  $(Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{с}})^{0,25}$  в формуле (5.14), т. е. при  $(Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{с}})^{0,25} = 1$ , решение задачи существенно упрощается и сводится к поиску («подбору параметра») температуры  $t_{\text{нар}}$  на основании одного уравнения (5.16) или (5.17).

На основании формул (5.2) – (5.21) разработан комплекс специальных программ расчётов (Файлы ТОВ1, ТОВ2, ТОВ3), позволяющих определять основные показатели процессов теплообмена при нагревании потока воды в трубе за счёт конвекции и излучения набегающего на неё поперечного потока

газа. Как уже отмечалось, подобие между процессами теплообмена, происходящими в такой трубе и в трубах конвективных поверхностях нагрева котла, позволяет исследовать надёжность режимов работы поверхностей нагрева котлов в условиях эксплуатации.

Таблица 5.1. Данные из теплового расчёта конвективного пучка (схема Z) котла ПТВМ-100. Топливо – мазут.

| Обозн.  | Нагрузка в % |     | Обозн.                            | Нагрузка в % |       |
|---|--------------|-----|-----------------------------------|--------------|-------|
|   | 100          | 40  |                                   | 100          | 40    |
| Температура газов и воды в нижнем ряду труб конвективного пучка, т.е. труб, обогреваемых газами со стороны топки. |              |     |                                   |              |       |
| $t_{\Gamma} = t_{\Gamma}^{\text{ВХ В КП}}$  | 1260         | 980 | $t_{\text{В}}^{\text{ВЫХ ИЗ КП}}$ | 144,6        | 119,7 |
| Температура газов и воды в верхних рядах труб конвективного пучка, т. е. труб в зоне уходящих газов.              |              |     |                                   |              |       |
| $t_{\Gamma}^{\text{ВЫХ ИЗ КП}} = t_{\text{ВХ}}$   | 230          | 126 | $t_{\text{В}}^{\text{ВХ В КП}}$   | 111          | 106   |

В порядке примера рассмотрим тепловой режим работы труб конвективного пучка в котле типа ПТВМ-100 в пиковом режиме. Значения основных температур по газам и воде согласно данным теплового расчёта в таком котле приведены в таблице 5.1. Как следует из данных, приведенных в этой таблице, согласно заводскому проекту движение потоков воды и газов в зоне конвективного пучка соответствует, так называемой противоточной (Z) схеме движения обоих теплоносителей, т.е. дымовые газы по газоходу движутся вверх, а вода по трубам конвективного пучка вниз.

Ниже в порядке примера (рис. 5.3, 5.4) даны выкопировки из рабочих листов файла ТОВЗ, в котором:

- по «Var1» приведены исходные данные и результаты расчёта теплообмена в трубе, работающей в условиях, аналогичных трубам конвективного пучка котла ПТВМ-100, расположенных в первых рядах со стороны топки, т.е. в начальном сечении газохода с температурой газов  $t_{\Gamma}^{\text{ВХ В КП}} = 1260^{\circ}\text{C}$ :

- по «Var2» – приведены аналогичные исходные данные и результаты расчёта теплообмена в трубе, работающей в условиях, аналогичных трубам конвективного пучка, расположенных в выходном сечении газохода с температурой  $t_{\Gamma}^{\text{ВЫХ ИЗ КП}} = t_{\text{ВХ}} = 230^{\circ}\text{C}$ .

В случае противотока (рис.5.3Z, рис.5.3aZ, рис.5.3бZ) температура воды в трубах по «Var1» (со стороны топки на выходе из конвективного пучка)  $t_{\text{В}}^{\text{ВЫХ ИЗ КП}} = 144,6^{\circ}\text{C}$ , а по «Var2» (на входе в пучок в зоне уходящих газов)  $t_{\text{В}}^{\text{ВХ В КП}} = 111^{\circ}\text{C}$ .

В случае прямотока (рис.5.4П, рис.5.4Па, рис.5.4Пб) температура воды в трубах по «Var1» (со стороны топки)  $t_{\text{В}}^{\text{ВХ В КП}} = 111^{\circ}\text{C}$ , а по «Var2» (на выходе из пучка в зоне уходящих газов)  $t_{\text{В}}^{\text{ВЫХ ИЗ КП}} = 144,6^{\circ}\text{C}$ .

На основании изложенного очевидно, что практический интерес представляют температурные режимы работы двух рядов труб конвективного

пучка котла: одного (самого верхнего), расположенного в газоходе на уровне сечения уходящих газов и обогреваемого ими в основном за счёт конвекции; второго (самого нижнего) – обогреваемого за счёт конвекции и излучения топочных газов. В данном случае интерес представляют локальные значения температур ( $t_{ж}$ ,  $t_{вн}$ ,  $t_{нар}$ ,  $t_{ок}$ ) и их перепады ( $\Delta t_{вн/ж}$ ,  $\Delta t_{вн/нар}$ ,  $\Delta t_{нар/ж}$ ,  $\Delta t_{нар/ок}$ ,  $\Delta t_{ок/ж}$ ) по сечениям труб, расположенных в области со стороны топки котла (рис. 5.3Zа) и уходящих газов (рис. 5.4Па). Как видно из результатов расчёта, в трубах, расположенных со стороны топки котла, эти показатели значительно выше. В отношении коррозионной безопасности к особым показателям следует отнести значения температур стенок труб, расположенных в зоне уходящих газов. Как уже отмечалось, в котлах традиционной конструкции (ПТВМ-50, ПТВМ-100 и др.), работающих в пиковом режиме по 2 – х ходовой схеме циркуляции, предусмотрена противоточная схема (Z) движения воды в пучке по отношению к потоку дымовых газов. В результате верхние ряды труб конвективного пучка контактируют с уходящими газами, охлаждаемыми сравнительно холодным потоком воды на выходе из боковых экранов котла (рис. 5.3Zб). Нижний ряд труб пакета конвективного пучка, в котором циркулирует вода, нагретая до почти рабочей температуры, наоборот подвержен тепловому воздействию топочной среды (рис. 5.3Zа). В связи с этим имеются основания полагать, что верхние ряды труб конвективного пучка с потоком сравнительно холодной воды в зоне уходящих газов наиболее уязвимы со стороны низкотемпературной коррозии. Гидравлическая и тепловая разверки также способствуют локальным пере- и недогревам воды в отдельных змеевиках. Кроме того, в нижних рядах труб конвективного пучка, обогреваемых топочными газами, не исключается опасность образования солевых отложений.

При замене противоточного (Z) режима работы конвективного пучка на прямоточный ситуация может измениться. В нижние ряды труб конвективного пучка, обращенных в сторону топки, будет поступать сравнительно холодная вода из экранов, а в верхних рядах труб конвективного пучка будет циркулировать вода уже достаточно нагретая в нижних рядах. В результате следует ожидать, что температура стенки верхних змеевиков конвективного пучка возрастёт на величину  $\Delta t_c$ , а нижнего – со стороны топки уменьшится, примерно, на ту же величину. При этом суммарное тепловосприятие обоих пакетов конвективного пучка не изменится. Это подтверждается анализом данных теплового расчёта того же котла ПТВМ-100 и основано на сравнительно малой величине соотношения водяных эквивалентов обоих теплоносителей. В частности, при 100% нагрузке котла: расход воды  $G_B = 2142 \text{ т/ч} = 595 \text{ кг/с}$ , расход мазута  $B_p = 12,53 \text{ т/ч} = 3,48 \text{ кг/с}$ , реальный объём дымовых газов  $V_{Г} = 12,6 \text{ нм}^3/\text{кг}$ , плотность газов  $\rho_{Г} = 1,32 \text{ кг/нм}^3$  и теплоёмкость  $C_{Г} = 1,095 \text{ Дж/(с}\cdot\text{К)}$ , теплоёмкость воды  $C_B = 4186,8 \text{ Дж/(с}\cdot\text{К)}$ . Тогда водяные эквиваленты теплоносителей:



– со стороны газов

$$W_{1Г} \approx W_{2Г} = W_Г = G_Г C_Г = B_Г V_Г \rho_Г C_Г = 3,48 \cdot 12,6 \cdot 1,32 \cdot 1,095 = 63 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{К});$$

– со стороны воды

$$W_{1В} \approx W_{2В} = W_В = G_В C_В = 595 \cdot 4186,8 = 2480 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{К}).$$

| ТОВЗ                | Версия 1.   | Версия 2.  | Противоточная (Z) компоновка конвективного пучка |                      |                                  |                                  |  |                                   |                                   |                                   |                                    |        |
|---------------------|---|--|--|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------|
| Сох. Вар.1          | Вос. Вар.1  | Температурный режим нагрева ( $q_1 > 0$ ) или охлаждения ( $q_1 < 0$ ) |  |                      |                                  |                                  |  |                                   |                                   |                                   |                                    |        |
| Сох. Вар.2          | Вос. Вар.2  | потока воды в трубе, обдуваемой поперечным потоком ГАЗА.               |  |                      |                                  |                                  |  |                                   |                                   |                                   |                                    |        |
| 0,0                 | 0,00  | 0,000  | 0,0000   | 0,00000              | ε пр                             | 0,35                             | 1,00100  | Вар.1                             | ВЫП                               | Стальн. тр-ба                     |                                    |        |
| 0,0                 | 0,00  | 0,000  | 0,0000   | 0,00000              |                                  | 0,35                             | 1,00100  | Вар.2                             | ВЫП                               | Стальн. тр-ба                     |                                    |        |
| От A <sub>1</sub> = | 30,00   | 30,00  | 35,56  | 41,11                | 46,67                            | 52,22                            | 57,78  | 63,33                             | 68,89                             | 74,44                             | 80,00                              |        |
| до A <sub>2</sub> = | 80,00   | Расч. Вар.1  |  | 1.Сохранить          |                                  | 1.Графики                        |  | 1.Удал. нак.                      |                                   | 1.Удал. граф.                     |                                    |        |
| От A <sub>1</sub> = | 30,00   | 30,00  | 35,56  | 41,11                | 46,67                            | 52,22                            | 57,78  | 63,33                             | 68,89                             | 74,44                             | 80,00                              |        |
| до A <sub>2</sub> = | 80,00   | Расч. Вар.2  |  | 2.Сохранить          |                                  | 2.Графики                        |  | 2.Удал. нак.                      |                                   | 2.Удал. граф.                     |                                    |        |
| П <sub>1</sub> →    | 1   | 2  | 3  | 4                    | 5                                | 6                                | 7  | Стальн. тр-ба                     |                                   | Полиэт. тр-ба                     |                                    |        |
| П <sub>1</sub> →    | 1   | 2  | 3  | 4                    | 5                                | 6                                | 7  | Стальн. тр-ба                     |                                   | Полиэт. тр-ба                     |                                    |        |
| Обозн.              | t <sub>ж</sub>  | w <sub>1</sub>   | d <sub>нар</sub>                                 | W <sub>воз</sub>     | t <sub>ок</sub>                  | λ <sub>1</sub>                   | b <sub>1</sub>   | d <sub>вн</sub>                   | δ <sup>авт</sup> <sub>ст</sub>    | G <sub>1</sub>                    |                                    |        |
| Вар. 1              | 144,6   | 1,46   | 28,0   | 7,0                  | 1260,0                           | 50,00                            | 0,0005   | 23,6                              | 2,19                              | 0,59                              | 2,11                               |        |
| Вар. 2              | 111,0   | 1,46   | 28,0   | 7,0                  | 230,0                            | 50,00                            | 0,0005   | 23,6                              | 2,19                              | 0,60                              | 2,17                               |        |
| Разм.               | °C  | м / с  | мм   | м / с                | °C                               | Вт/(м*К)                         | 1/°C   | мм                                | мм                                | кг / с                            | т / ч                              |        |
| Обозн.              | t <sub>вн</sub>   | t <sub>нар</sub>   | Δt <sub>вн/ж</sub>                               | Δt <sub>вн/нар</sub> | Δt <sub>нар/ж</sub>              | Δt <sub>ок/ж</sub>               | q <sub>Σ1</sub>  | q <sup>k</sup> <sub>1</sub>       | q <sup>л</sup> <sub>1</sub>       | q <sup>вн</sup> <sub>s</sub>      | q <sup>нар</sup> <sub>s</sub>      |        |
| Вар. 1              | 161,71  | 168,024  | 17,1   | 6,32                 | 23,4                             | 1115,4                           | 12634,6  | 2893,2                            | 9741,4                            | 170255                            | 143633                             |        |
| Вар. 2              | 111,57  | 111,773  | 0,6  | 0,20                 | 0,8                              | 119,0                            | 388,0  | 313,24                            | 74,76                             | 5228                              | 4411                               |        |
| Разм.               | °C  | °C   | °C   | °C                   | °C                               | °C                               | Вт / м   | Вт / м                            | Вт / м                            | Вт / м <sup>2</sup>               | Вт / м <sup>2</sup>                |        |
| Обозн.              | α <sub>вн</sub>   | α <sub>ок</sub>  | Q <sub>сп</sub>                                  | ρ <sub>вод</sub>     | R <sub>вп</sub>                  | R <sub>1</sub>                   | R <sub>о</sub>   | R <sub>тп</sub>                   | Γ <sub>вп</sub>                   | Γ <sub>1</sub>                    | Γ <sub>о</sub>                     |        |
| Вар. 1              | 9952,9  | 30,1   | 354,8  | 916,0                | 0,0014                           | 0,0005                           | 0,3774   | 0,3793                            | 0,0036                            | 0,0013                            | 0,9951                             |        |
| Вар. 2              | 9100,9  | 30,1   | 280,7  | 944,1                | 0,0015                           | 0,0005                           | 0,3774   | 0,3794                            | 0,0039                            | 0,0014                            | 0,9947                             |        |
| Разм.               | Вт/(м <sup>2</sup> К)   | Вт/(м <sup>2</sup> К)  | кВт  | кг / м <sup>3</sup>  | м*К / Вт                         | м*К / Вт                         | м*К / Вт   | м*К / Вт                          | -                                 | -                                 | -                                  |        |
| Обозн.              | t' <sub>нар</sub>   | P <sub>1с</sub>  | t' <sub>нар</sub>                                | δ <sub>p</sub>       | λ <sub>ж</sub> (t <sub>ж</sub> ) | μ <sub>ж</sub> (t <sub>ж</sub> ) | ν <sub>ж</sub> (t <sub>ж</sub> )                       | Re <sub>ж</sub> (t <sub>ж</sub> ) | Nu <sub>ж</sub> (t <sub>ж</sub> ) | Pr <sub>ж</sub> (t <sub>ж</sub> ) | Pr <sub>ж</sub> (t <sub>вн</sub> ) |        |
| Вар. 1              | 144,74  | 168,02   | 168,02   | -4E-08               | 0,592                            | 2E-05                            | 2E-07  | 2E+05                             | 4E+02                             | 1,148                             | 1,279                              |        |
| Вар. 2              | 111,11  | 111,77   | 111,77   | -1E-05               | 0,589                            | 3E-05                            | 3E-07  | 1E+05                             | 4E+02                             | 1,557                             | 1,549                              |        |
| Разм.               | °C  | °C   | °C   | %                    | кк/(м*ч*К)                       | кгс*с/м <sup>2</sup>             | м <sup>2</sup> /с                                      | -                                 | -                                 | -                                 | -                                  |        |
| Обозн.              | δ <sub>ст</sub> = A <sub>4</sub> *d <sup>4</sup> + A <sub>3</sub> *d <sup>3</sup> + A <sub>2</sub> *d <sup>2</sup> + A <sub>1</sub> *d + A <sub>0</sub> |  |  |                      |                                  |                                  | A <sub>4</sub>   | A <sub>3</sub>                    | A <sub>2</sub>                    | A <sub>1</sub>                    | A <sub>0</sub>                     |        |
| Вар. 1              | Стальн. тр-ба   |  |  |                      |                                  |                                  | Стальная тр-ба, δ <sub>ст</sub> = f(d <sub>нст</sub> ) | 3E-11                             | -2E-08                            | -3E-05                            | 0,028                              | 1,4272 |
| Вар. 2              | Стальн. тр-ба   |  |  |                      |                                  |                                  | Стальная тр-ба, δ <sub>ст</sub> = f(d <sub>нст</sub> ) | 3E-11                             | -2E-08                            | -3E-05                            | 0,028                              | 1,4272 |
| Вари-анты           | δ <sub>ст</sub> = A <sub>4</sub> *d <sup>4</sup> + A <sub>3</sub> *d <sup>3</sup> + A <sub>2</sub> *d <sup>2</sup> + A <sub>1</sub> *d + A <sub>0</sub> |  |  |                      |                                  |                                  | A <sub>4</sub>   | A <sub>3</sub>                    | A <sub>2</sub>                    | A <sub>1</sub>                    | A <sub>0</sub>                     |        |
| расч.               | Полиэт. тр-ба   |  |  |                      |                                  |                                  | Полиэт. тр-ба, δ <sub>пз</sub> = f(d <sub>нст</sub> )  | 1E-11                             | -4E-08                            | 5E-05                             | -0,0023                            | 2,2327 |

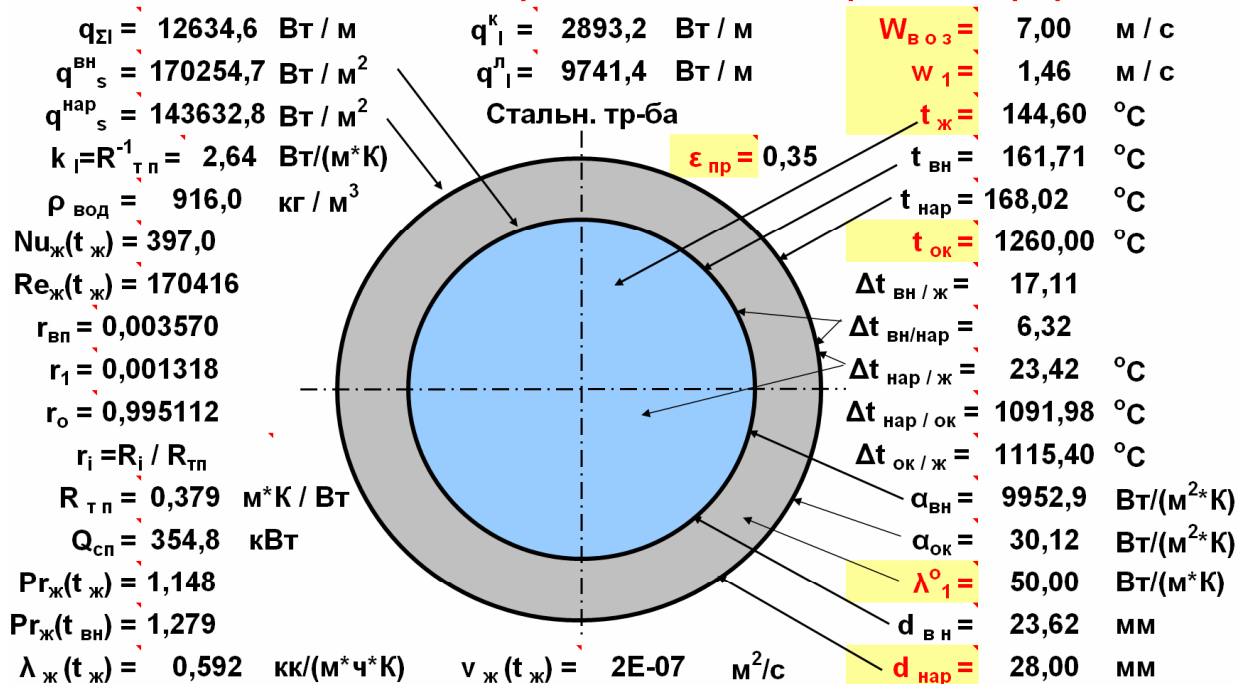
Рис. 5.3Z. Фрагмент из файла ТОВЗ (к рис. 5.3Zа,б).

Тот факт, что соотношение  $W_{1Г} / W_{1В} \approx W_{2Г} / W_{2В} = W_Г / W_В = 63 \cdot 10^3 / (2480 \cdot 10^3) = 0,0254 < 0,05$  свидетельствует об однозначности [53], т. е. о постоянстве тепловосприятости конвективного пучка, работающего как в режиме противотока (Z) так и в режиме прямотока (П). Из этого следует, что с точки зрения процессов теплообмена перевод работы конвективного пучка с противоточной схемы на прямоточную не приведёт к ухудшению экономичности котла. При этом вероятность увеличения коррозионной стойкости поверхностей нагрева имеет тенденцию к возрастанию.

ТОВЗ

Конструктивная схема сечения одиночной трубы  
с потоком воды, обдуваемая поперечным потоком газа.

Исходные данные для расчёта отмечены красным шрифтом



Графическое отображение составляющих ( $r_i = R_i / R_{Тп}$ ) теплового сопротивления потоку теплоты через стенку трубы.

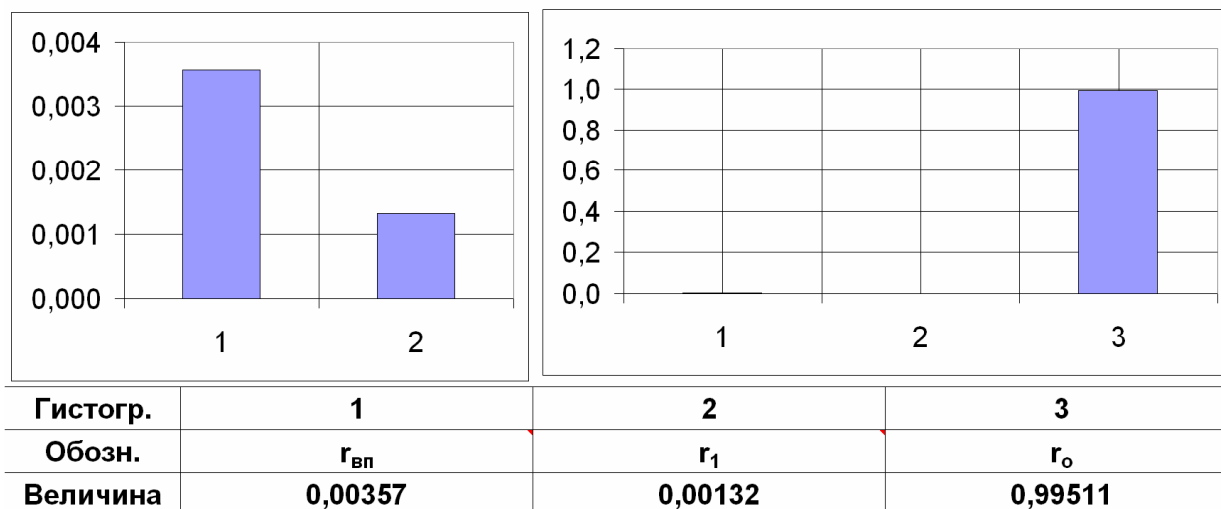


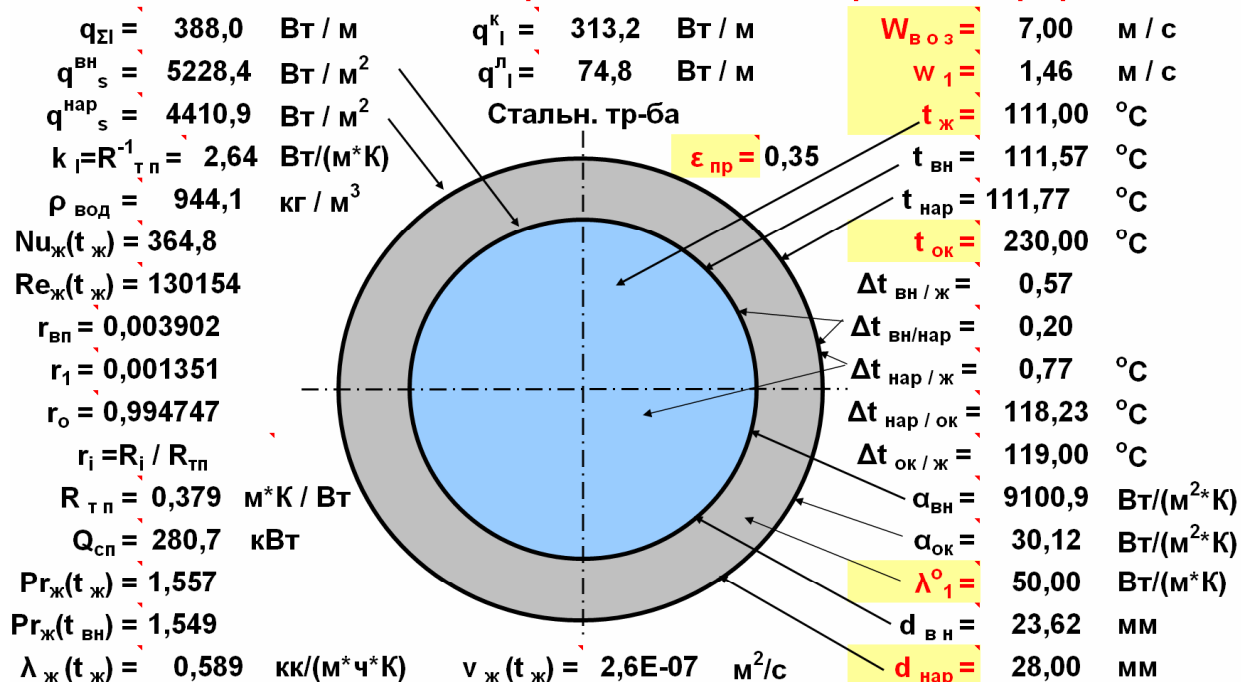
Рис. 5.3За. Теплотехнические показатели конвективного пучка котла ПТВМ-100 со стороны топки при противоточном движении теплоносителей.

Следует заметить, что в порядке эксперимента [72] питание котла ПТВМ-100, организованное со стороны выходных коллекторов вопреки традиционной схеме, предусмотренной проектом, практически не оказало влияния на выходные параметры теплоносителя. Очевидно, что в этом случае конвективный пучок «заработал» в прямоточном режиме. К сожалению, серьёзных наблюдений [72] в этом случае не было сделано и уникальный эксперимент оказался бесплодным. Однако, с помощью программного файла ТОВЗ оказалось возможным в определённой мере «повторить» выполненный опыт [72], но только с помощью математической модели на компьютере.

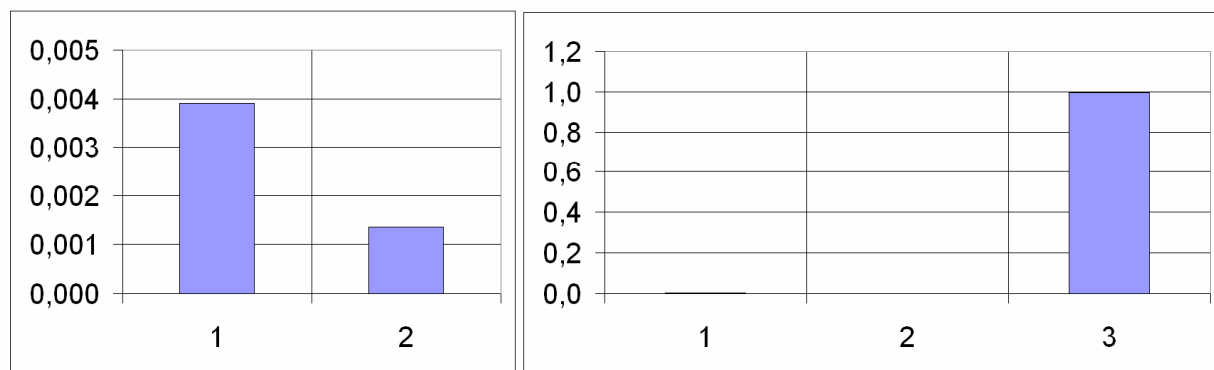
ТОВЗ

Конструктивная схема сечения одиночной трубы  
с потоком воды, обдуваемая поперечным потоком газа.

Исходные данные для расчёта отмечены красным шрифтом



Графическое отображение составляющих ( $r_i = R_i / R_{тп}$ ) теплового сопротивления потоку теплоты через стенку трубы.



| Гистогр. | 1        | 2       | 3       |
|----------|----------|---------|---------|
| Обозн.   | $r_{вп}$ | $r_1$   | $r_o$   |
| Величина | 0,00390  | 0,00135 | 0,99475 |

Рис. 5.3Zб. Теплотехнические показатели конвективного пучка котла ПТВМ-100 в сечении уходящих газов при противоточном движении теплоносителей.

Ниже в свете изложенного дана фрагмент из того же файла ТОВЗ (рис. 5.4П) с прямоточным (П) движением теплоносителей, т. е. газов и воды в конвективном пучке. На рис. рис. 5.4Па и рис. 5.4Пб приведены соответствующие результаты расчётов, аналогичных тем, которые даны на рис. 5.3Z, рис. 5.3Zа и рис. 5.3Zб выше.

Данные, приведенные в фрагментах из файла ТОВЗ (по сх. Z, и сх. П), на рис. 5.3Z, рис. 5.3Zа, рис. 5.3Zб, рис. 5.4П, рис. 5.4Па, рис. 5.4Пб и в таблицах 5.1, 5.2 выполнены на основании исходных данных из теплового расчёта котла ПТВМ-100, а именно:  $W_{воз} = W_{газов}$ ,  $w_1 = w_{воды}$ ,  $t_{ж} = t_{воды}$

| ТОВЗ                | Версия 1.   | Версия 2.  | Прямоточная (П) компоновка конвективного пучка |                     |                         |                       |                       |                       |                     |                     |                     |       |
|---------------------|---|--|--|---------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|
| Сох. Вар.1          | Вос. Вар.1  | Температурный режим нагрева ( $q_1 > 0$ ) или охлаждения ( $q_1 < 0$ ) |  |                     |                         |                       |                       |                       |                     |                     |                     |       |
| Сох. Вар.2          | Вос. Вар.2  | потока воды в трубе, обдуваемой поперечным потоком ГАЗА.               |  |                     |                         |                       |                       |                       |                     |                     |                     |       |
| 0,0                 | 0,00  | 0,000  | 0,0000   | 0,00000             | $\epsilon_{пр}$         | 0,35                  | 1,00100               | Вар.1                 | ВЫП                 | Стальн. тр-ба       |                     |       |
| 0,0                 | 0,00  | 0,000  | 0,0000   | 0,00000             | $\epsilon_{пр}$         | 0,35                  | 1,00100               | Вар.2                 | ВЫП                 | Стальн. тр-ба       |                     |       |
| От $A_1 =$          | 30,00   | 30,00  | 35,56  | 41,11               | 46,67                   | 52,22                 | 57,78                 | 63,33                 | 68,89               | 74,44               | 80,00               |       |
| до $A_2 =$          | 80,00   | Расч. Вар.1  | 1.Сохранить                                    |                     | 1.Графики               |                       | 1.Удал. нак.          |                       | 1.Удал. граф.       |                     |                     |       |
| От $A_1 =$          | 30,00   | 30,00  | 35,56  | 41,11               | 46,67                   | 52,22                 | 57,78                 | 63,33                 | 68,89               | 74,44               | 80,00               |       |
| до $A_2 =$          | 80,00   | Расч. Вар.2  | 2.Сохранить                                    |                     | 2.Графики               |                       | 2.Удал. нак.          |                       | 2.Удал. граф.       |                     |                     |       |
| $\Pi_1 \rightarrow$ | 1   | 2  | 3  | 4                   | 5                       | 6                     | 7                     | Стальн. тр-ба         |                     | Полиэт. тр-ба       |                     |       |
| $\Pi_1 \rightarrow$ | 1   | 2  | 3  | 4                   | 5                       | 6                     | 7                     | Стальн. тр-ба         |                     | Полиэт. тр-ба       |                     |       |
| Обозн.              | $t_{ж}$   | $w_1$  | $d_{нар}$                                      | $W_{в оз}$          | $t_{ок}$                | $\lambda_1^0$         | $b_1$                 | $d_{вн}$              | $\delta_{ст}^{ABT}$ | $G_1$               |                     |       |
| Вар. 1              | 111,0   | 1,46   | 28,0   | 7,0                 | 1260,0                  | 50,00                 | 0,0005                | 23,6                  | 2,19                | 0,60                | 2,17                |       |
| Вар. 2              | 144,6   | 1,46   | 28,0   | 7,0                 | 230,0                   | 50,00                 | 0,0005                | 23,6                  | 2,19                | 0,59                | 2,11                |       |
| Разм.               | $^{\circ}C$   | м / с  | мм   | м / с               | $^{\circ}C$             | Вт/(м <sup>2</sup> К) | 1/ $^{\circ}C$        | мм                    | мм                  | кг / с              | т / ч               |       |
| Обозн.              | $t_{вн}$  | $t_{нар}$  | $\Delta t_{вн/ж}$                              | $\Delta t_{вн/нар}$ | $\Delta t_{нар/ж}$      | $\Delta t_{ок/ж}$     | $q_{\Sigma 1}$        | $q_1^k$               | $q_1^l$             | $q_s^{вн}$          | $q_s^{нар}$         |       |
| Вар. 1              | 129,86  | 136,321  | 18,9   | 6,46                | 25,3                    | 1149,0                | 12735,9               | 2977,2                | 9758,7              | 171620              | 144785              |       |
| Вар. 2              | 144,98  | 145,128  | 0,4  | 0,14                | 0,5                     | 85,4                  | 284,3                 | 224,87                | 59,40               | 3831                | 3232                |       |
| Разм.               | $^{\circ}C$   | $^{\circ}C$  | $^{\circ}C$                                    | $^{\circ}C$         | $^{\circ}C$             | $^{\circ}C$           | Вт / м                | Вт / м                | Вт / м              | Вт / м <sup>2</sup> | Вт / м <sup>2</sup> |       |
| Обозн.              | $\alpha_{вн}$   | $\alpha_{ок}$  | $Q_{сп}$                                       | $\rho_{вод}$        | $R_{вп}$                | $R_1$                 | $R_o$                 | $R_{тп}$              | $r_{вп}$            | $r_1$               | $r_o$               |       |
| Вар. 1              | 9100,9  | 30,1   | 280,7  | 944,1               | 0,0015                  | 0,0005                | 0,3774                | 0,3794                | 0,0039              | 0,0013              | 0,9948              |       |
| Вар. 2              | 9952,9  | 30,1   | 354,8  | 916,0               | 0,0014                  | 0,0005                | 0,3774                | 0,3793                | 0,0036              | 0,0013              | 0,9951              |       |
| Разм.               | Вт/(м <sup>2</sup> К)   | Вт/(м <sup>2</sup> К)  | кВт  | кг / м <sup>3</sup> | м <sup>2</sup> К / Вт   | м <sup>2</sup> К / Вт | м <sup>2</sup> К / Вт | м <sup>2</sup> К / Вт | -                   | -                   | -                   |       |
| Обозн.              | $t'_{нар}$  | $P1_c$   | $t'_{нар}$                                     | $\delta_p$          | $\lambda_{ж}(t_{ж})$    | $\mu_{ж}(t_{ж})$      | $\nu_{ж}(t_{ж})$      | $Re_{ж}(t_{ж})$       | $Nu_{ж}(t_{ж})$     | $Pr_{ж}(t_{ж})$     | $Pr_{ж}(t_{вн})$    |       |
| Вар. 1              | 111,11  | 136,32   | 136,32   | -4E-06              | 0,589                   | 3E-05                 | 3E-07                 | 1E+05                 | 4E+02               | 1,557               | 1,308               |       |
| Вар. 2              | 144,74  | 145,13   | 145,13   | -1E-05              | 0,592                   | 2E-05                 | 2E-07                 | 2E+05                 | 4E+02               | 1,148               | 1,145               |       |
| Разм.               | $^{\circ}C$   | $^{\circ}C$  | $^{\circ}C$                                    | %                   | кк/(м <sup>2</sup> ч*К) | кгс*с/м <sup>2</sup>  | м <sup>2</sup> /с     | -                     | -                   | -                   | -                   |       |
| Обозн.              | $\delta_{ст} = A_4 * d^4 + A_3 * d^3 + A_2 * d^2 + A_1 * d + A_0$ |  |  |                     |                         |                       |                       | $A_4$                 | $A_3$               | $A_2$               | $A_1$               | $A_0$ |
| Вар. 1              | Стальн. тр-ба   |  | Стальная тр-ба, $\delta_{ст} = f(d_{нст})$     |                     |                         |                       | 3E-11                 | -2E-08                | -3E-05              | 0,028               | 1,4272              |       |
| Вар. 2              | Стальн. тр-ба   |  | Стальная тр-ба, $\delta_{ст} = f(d_{нст})$     |                     |                         |                       | 3E-11                 | -2E-08                | -3E-05              | 0,028               | 1,4272              |       |
| Варианты            | $\delta_{ст} = A_4 * d^4 + A_3 * d^3 + A_2 * d^2 + A_1 * d + A_0$ |  |  |                     |                         |                       |                       | $A_4$                 | $A_3$               | $A_2$               | $A_1$               | $A_0$ |
| расч.               | Полиэт. тр-ба   |  | Полиэт. тр-ба, $\delta_{пэ} = f(d_{нст})$      |                     |                         |                       | 1E-11                 | -4E-08                | 5E-05               | -0,0023             | 2,2327              |       |

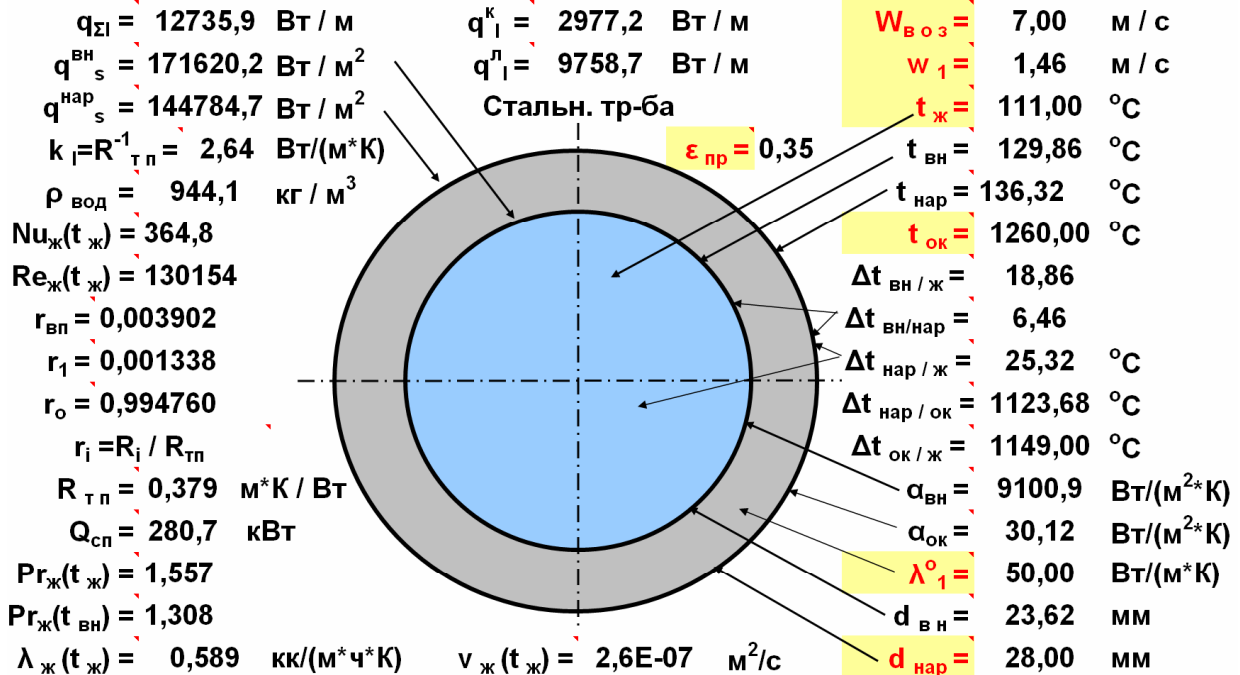
Рис. 5.4П. Фрагмент из файла ТОВЗ (к рис. 5.4Па,б)

и  $t_{ок} = t_{ухгазов}$  или  $t_{ок} = t_{топки}$  при  $\epsilon_{пр} = 0,35$ , работающего на мазуте в пиковом режиме при нагрузке 100%. Температура воды на входе в котёл (после деаэратора)  $104^{\circ}C$  и на выходе  $150^{\circ}C$ . Удельная теплопроводность стали труб принята  $\lambda_1^0 = 50$  Вт/(м<sup>2</sup> К), диаметр труб – 28x3 мм. Здесь же на рис. 5.3За, 5.3Зб и рис. 5.4Па, 5.4Пб приведены данные ряда других теплофизических показателей по сечению обогреваемой трубы: расчётные значения плотностей тепловых потоков ( $q_{\Sigma 1}$ ,  $q_1^k$ ,  $q_1^l$ ,  $q_s^{вн}$ ,  $q_s^{нар}$ ); коэффициенты теплопередачи ( $k_1$ ) между потоком воды и окружающей средой; плотности ( $\rho_{вод}$ ), удельные коэффициенты теплопроводности ( $\lambda_{ж}(t_{ж})$ ) и кинематические коэффициенты вязкости ( $\nu_{ж}(t_{ж})$ ) воды; критерии  $Nu(t_{ж})$ ,  $Re(t_{ж})$ ,  $Pr(t_{ж})$ ,  $Pr(t_{вн})$ , и относительные ( $r_{вн} = R_{вн} / R_{тп}$ ,  $r_o = R_o / R_{тп}$  по отношению к суммарному значению  $R_{тп} = R_{вн} + R_1 + R_o$ ) тепловые сопротив-

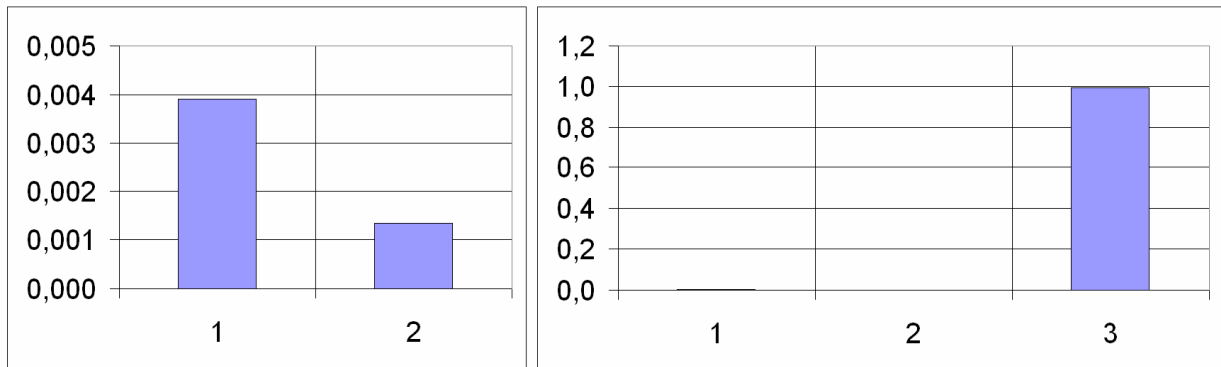
ТОВЗ

Конструктивная схема сечения одиночной трубы с потоком воды, обдуваемая поперечным потоком газа.

Исходные данные для расчёта отмечены красным шрифтом



Графическое отображение составляющих ( $r_i = R_i / R_{тп}$ ) теплового сопротивления потоку теплоты через стенку трубы.



| Гистогр. | 1        | 2       | 3       |
|----------|----------|---------|---------|
| Обозн.   | $r_{вн}$ | $r_1$   | $r_o$   |
| Величина | 0,00390  | 0,00134 | 0,99476 |

Рис. 5.4Па. Теплотехнические показатели конвективного пучка котла

ПТВМ-100 со стороны топки при прямоточном движении теплоносителей.

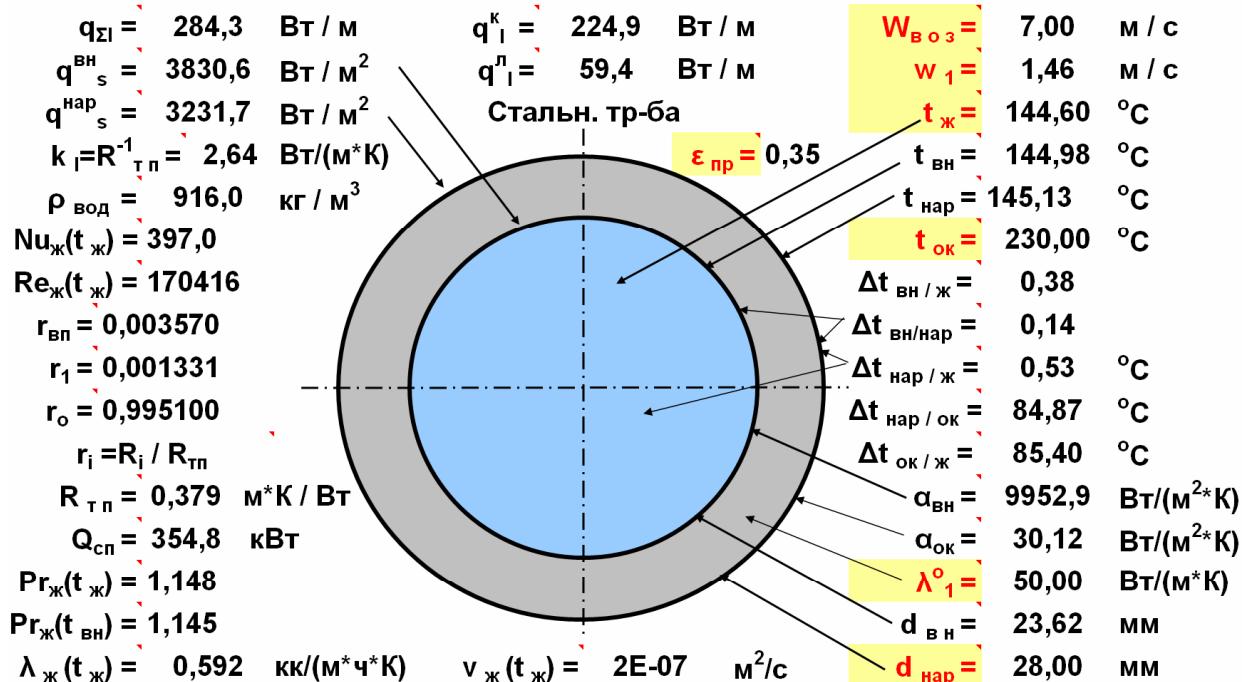
ления потоку теплоты через стенки труб. Основные результаты расчётов, представляющих практический интерес и выполненные на основании файла ПОВЗ, сведены в таблицу 5.2. Приведенные в ней данные подтверждают высказанное выше предположение о том, что в результате перевода режима работы конвективного пучка котла с противоточной схемы Z на прямоточную П температурный уровень стали труб в коррозионноопасной зоне уходящих газов возрастёт, а со стороны топки, т. е. в зоне высоких температур газов, снизится.

Следует отметить, что выявленная особенность температурных режимов работы конвективного пучка относится также к котлам типа КВГМ и

ТОВЗ

Конструктивная схема сечения одиночной трубы  
с потоком воды, обдуваемая поперечным потоком газа.

Исходные данные для расчёта отмечены красным шрифтом



Графическое отображение составляющих ( $r_i = R_i / R_{тп}$ ) теплового сопротивления потоку теплоты через стенку трубы.

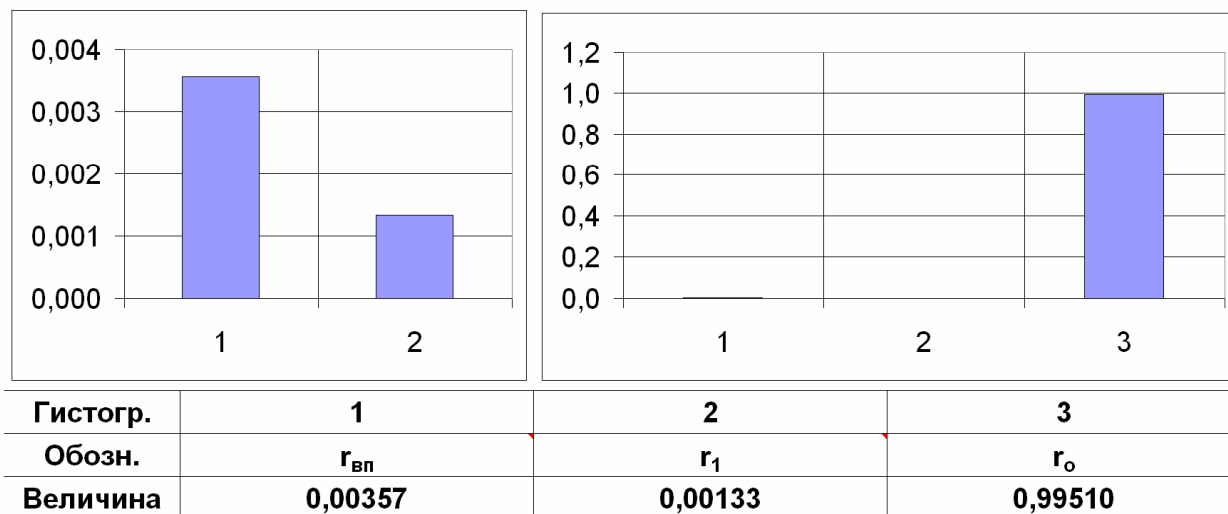


Рис. 5.4Пб. Теплотехнические показатели конвективного пучка котла ПТВМ-100 в сечении уходящих газов при прямоточном движении теплоносителей.

др., где соотношения водяных эквивалентов обоих теплоносителей (дымовых газов и воды)  $W_{г}/W_{в} \leq 0,025$ . Этот факт следует учитывать при разработках по повышению коррозионной стойкости конвективных пучков в котлах аналогичных конструкций.

Практический интерес представляют также результаты расчёта и анализа температурных режимов стенки и теплопотерь в дымовой трубе, охлаждаемой наружным воздухом. Фрагмент из соответствующего программного файла ДыТр1 дана на рис. 5.5.

Таблица 5.2. Результаты расчёта показателей конвективного пучка.

| Обозн.              | Со стороны топки.<br>Нагр. 100% |                     | В зоне уходящих газов.<br>Нагр. 100% |                     |
|---------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------|
|                     | Рис. 5.3Zа<br>Сх. Z             | Рис. 5.4Па<br>Сх. П | Рис. 5.3Zб<br>Сх. Z                  | Рис. 5.4Пб<br>Сх. П |
| $t_{ж}$             | <b>144,60</b>                   | <b>111,00</b>       | <b>111,00</b>                        | <b>144,60</b>       |
| $t_{вн}$            | 161,71                          | 129,86              | 111,57                               | 144,98              |
| $t_{нар}$           | <b>168,02</b>                   | <b>136,32</b>       | <b>111,77</b>                        | <b>145,13</b>       |
| $t_{ок}$            | 1260,0                          | 1260,0              | 230,00                               | 230,00              |
| $\Delta t_{вн/ж}$   | 17,11                           | 18,86               | 0,57                                 | 0,38                |
| $\Delta t_{вн/нар}$ | 6,32                            | 6,46                | 0,20                                 | 0,14                |
| $\Delta t_{нар/ж}$  | <b>23,42</b>                    | <b>25,32</b>        | <b>0,77</b>                          | <b>0,53</b>         |
| $\Delta t_{нар/ок}$ | 1092,0                          | 1123,7              | 118,23                               | 84,87               |
| $\Delta t_{ок/ж}$   | 1115,4                          | 1149,0              | 119,00                               | 85,40               |

Из опыта эксплуатации водогрейных котлов известно, что снижение температурного уровня воды в котле на  $1^{\circ}\text{C}$  приводит к соответствующему снижению температуры уходящих газов, примерно, на ту же величину [73]. Здесь, как уже отмечалось, сказывается известное отличие между процессами теплообмена в топке и газоходе котла. В частности, изменение температуры воды  $t_{ж}$ , циркулирующей в экранах топки, практически не влияет на изменение температуры топочных газов  $t_{т}$  на выходе из нее, т. е.  $\partial t_{т} / \partial t_{ж} \approx 0.01 - 0.015$ . В то же время изменение температуры воды  $t_{ж}$ , циркулирующей в конвективных поверхностях нагрева, приводит к изменению температуры уходящих газов  $t_{yx}$  практически на ту же величину, т. е.  $\partial t_{yx} / \partial t_{ж} \approx 0,99 - 1,04$ .

Общие закономерности, характеризующие изменения температурного уровня воды в трубах конвективного пучка и экранов топки на температуру газов определим на основании анализа изменения средних теплоёмкостей газов  $C$ . В частности, имеем в виду, что в исследуемом интервале температур  $t$  теплоёмкость газов определяется линейной зависимостью  $C = A + Bt$ . Следовательно, энтальпия их выражается так:

$$i = Ct = t(A + Bt). \quad (5.22)$$

Соответственно

$$t = -0,5AB^{-1} + [0,25A^2B^{-2} + iB^{-1}]^{0,5}. \quad (5.23)$$

Следует обратить внимание на тот факт, что показатель  $i$  представляет собой тепловой потенциал рабочего газа на единицу его массы. В пересчёте на единицу массы сожжённого топлива с учётом (5.22) он преобразуется к виду:

$$I = i\rho_{\Gamma}^0 V_{\Gamma} = \rho_{\Gamma}^0 V_{\Gamma} t(A + Bt), \quad (5.24)$$

где  $\rho_{\Gamma}^0$  и  $V_{\Gamma}$  – плотность и объём реальных дымовых газов в нормальных условиях при сгорании топлива. Здесь следует иметь в виду, что при выполнении

ДыТр1 Анализ теплотерь через поверхность Разр. д.т.н. Байрашевский Б.А.  
 ДЫМОВОЙ ТРУБЫ, размещённой на открытом воздухе. Т1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

| Обозн.  | $d_{1вп}$                          | $d_{1нп}$         | $d_{2вп}$              | $d_{2нп}$              | $d_{3п}$               | $V_{\Gamma}^0$             | $Q_{\Gamma}^p$       | $\eta_{бр}$                | $\alpha_{дт}$        | $t_{дг}$              | $\lambda_{1п}^0$       |    |
|---------|------------------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----|
| Расч. 1 | 0,193                              | 0,200             | 0,380                  | 0,419                  | 0,450                  | 10,9                       | 9200                 | 0,93                       | 1,3                  | 300,00                | 53,00                  |    |
| Расч. 2 | 2,000                              | 2,200             | 2,380                  | 2,420                  | 2,450                  | 10,9                       | 9200                 | 0,93                       | 1,3                  | 150,00                | 53,00                  |    |
| Разм.   | м                                  | м                 | м                      | м                      | м                      | нм <sup>3</sup> /кг        | ккал/кг              | -                          | -                    | °С                    | Вт/(м*К)               |    |
| СоМо1   | Т1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ (продолжение). |                   |                        |                        |                        | ВоМо1                      | Буф.Граф.            | Уд.Нак.                    | Уд.Буф.              |                       |                        |    |
| Обозн.  | $\lambda_{12п}^0$                  | $\lambda_{2п}^0$  | $\lambda_{3п}^0$       | $W_{в оз}$             | $b_{1п}$               | $b_{12п}$                  | $b_{2п}$             | $b_{3п}$                   | $Q_{к}$              | $\rho_{дг}^0$         |                        |    |
| Расч. 1 | 0,3000                             | 0,0900            | 50,00                  | 8,000                  | 0,0002                 | 0,0002                     | 0,0002               | 0,0002                     | 1,0                  | 1,2                   | 1,293                  |    |
| Расч. 2 | 0,3000                             | 0,0900            | 50,00                  | 8,000                  | 0,0002                 | 0,0002                     | 0,0002               | 0,0002                     | 1,0                  | 1,2                   | 1,31                   |    |
| Разм.   | Вт/(м*К)                           | Вт/(м*К)          | Вт/(м*К)               | м/с                    | 1/°С                   | 1/°С                       | 1/°С                 | 1/°С                       | Гкал/ч               | МВт                   | кг/нм <sup>3</sup>     |    |
| СоМо2   | Т2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА             |                   |                        |                        |                        | ВЫП                        | ВоМо2                | Сохранить                  |                      | Расч. вар. 1          |                        |    |
| Обозн.  | $r_{RO2}$                          | $r_{H2O}$         | $\epsilon_c$           | $t_o$                  | $\epsilon'_c$          | $(k_{r r_{п}})_T = k^T_r$  | $S_{Tр}$             | $P_{1c}$                   | $t'_{1вп}$           | $\delta_p$            |                        |    |
| Расч. 1 | 0,130                              | 0,110             | 0,6                    | 5,00                   | 0,8                    | 0,843                      | 0,843                | 0,1834                     | 286,0                | 286,0                 | -4E-07                 |    |
| Расч. 2 | 0,130                              | 0,110             | 0,6                    | 5,00                   | 0,8                    | 0,266                      | 0,266                | 1,9                        | 109,7                | 109,7                 | 2E-07                  |    |
| Разм.   | -                                  | -                 | -                      | °С                     | -                      | 1/(м*кгс/см <sup>2</sup> ) | м                    | °С                         | °С                   | %                     |                        |    |
| СоМо3   | Т2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА (прод. 1)   |                   |                        |                        |                        | ВЫП                        | ВоМо3                | Расч. вар. 2               |                      |                       |                        |    |
| Обозн.  | $\epsilon_r$                       | $\rho_{дг}$       | $\alpha_{1вп}^k$       | $\alpha_{1вп}^n$       | $\alpha_{1вп}$         | $q_s^{лвн}$                | $q_{1п}^k$           | $q_{1п}^n$                 | $q_{1п}$             | $\alpha_o$            | $t_{1вп}$              |    |
| Расч. 1 | 0,143                              | 0,6160            | 58,99                  | 4,74                   | 63,73                  | 66                         | 499,3                | 40,1                       | 539,39               | 31,399                | 286,04                 |    |
| Расч. 2 | 0,397                              | 0,8455            | 0,78                   | 4,75                   | 5,53                   | 191                        | 198,31               | 1201,5                     | 1399,8               | 31,399                | 109,72                 |    |
| Разм.   | -                                  | кг/м <sup>3</sup> | Вт/(м <sup>2</sup> *К) | Вт/(м <sup>2</sup> *К) | Вт/(м <sup>2</sup> *К) | Вт / м <sup>2</sup>        | Вт / м               | Вт / м                     | Вт / м               | Вт / м                | Вт/(м <sup>2</sup> *К) | °С |
| Обозн.  | $t_{1нп}$                          | $t_{2вп}$         | $t_{2нп}$              | $t_{3п}$               | $w_{дг}$               | $R_{вп}$                   | $R_{1п}$             | $R_{12п}$                  | $R_{2п}$             | $R_{3п}$              | $R_o$                  |    |
| Расч. 1 | 285,99                             | 109,30            | 17,27                  | 17,2                   | 33,01                  | 0,0259                     | 0,0001               | 0,3276                     | 0,1706               | 0,0002                | 0,0225                 |    |
| Расч. 2 | 109,32                             | 51,85             | 10,85                  | 10,8                   | 0,23                   | 0,0288                     | 0,0003               | 0,0411                     | 0,0293               | 0,0000                | 0,0041                 |    |
| Разм.   | °С                                 | °С                | °С                     | °С                     | м/с                    | м*К / Вт                   | м*К / Вт             | м*К / Вт                   | м*К / Вт             | м*К / Вт              | м*К / Вт               |    |
| Обозн.  | $R_{п}$                            | $R_{эи}$          | $\lambda_{эи}$         | $k_{1з} = R_{п}^{-1}$  | $G_{дг}$               | $\lambda_{1п}^{cp}$        | $\lambda_{12п}^{cp}$ | $\lambda_{2п}^{cp}$        | $\lambda_{3п}^{cp}$  | $r_{вп}$              |                        |    |
| Расч. 1 | 0,5469                             | 0,4985            | 0,2703                 | 1,8284                 | 0,595                  | 2141                       | 56,032               | 0,312                      | 0,091                | 50,172                | 0,047                  |    |
| Расч. 2 | 0,1036                             | 0,0707            | 0,4570                 | 9,6539                 | 0,603                  | 2170                       | 54,161               | 0,305                      | 0,091                | 50,108                | 0,278                  |    |
| Разм.   | м*К / Вт                           | м*К / Вт          | Вт/(м*К)               | Вт/(м*К)               | кг / с                 | кг / ч                     | Вт/(м*К)             | Вт/(м*К)                   | Вт/(м*К)             | Вт/(м*К)              | -                      |    |
| Обозн.  | $r_{1п}$                           | $r_{12п}$         | $r_{2п}$               | $r_{3п}$               | $r_o$                  | $Pr_{ж}(t_{1вп}^{cp})$     | $Pr_c(t'_{1вп})$     | $\lambda_{п}(t_{1п}^{cp})$ | $v_{п}(t_{1п}^{cp})$ | $Re_{ж}(t_{1п}^{cp})$ | $t'_{1вп1,2}$          |    |
| Расч. 1 | 0,000                              | 0,5989            | 0,312                  | 0,0004                 | 0,041                  | 0,652                      | 0,655                | 0,042                      | 4E-05                | 1E+05                 | 300,0                  |    |
| Расч. 2 | 0,003                              | 0,3964            | 0,283                  | 0,000                  | 0,040                  | 0,688                      | 0,700                | 0,031                      | 3E-05                | 2E+04                 | 150,0                  |    |
| Разм.   | -                                  | -                 | -                      | -                      | -                      | -                          | -                    | к/(м*ч*К)                  | м <sup>2</sup> /с    | -                     | °С                     |    |

### Т3. РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАСЧЁТОВ.

| Обозн.  | $R_{вп}^k$ | $\alpha_{1вп}$         | $q_{1п}^k$ | $q_{1п}^n$ | $q_{1п}$ | $\pi$  | $g$                | $K_p$   |
|---------|------------|------------------------|------------|------------|----------|--------|--------------------|---------|
| Расч. 1 | 0,0280     | 63,73                  | 499,3      | 40,1       | 539,39   | 3,1416 | 9,81               | 1,163   |
| Расч. 2 | 0,2031     | 5,53                   | 198,3      | 1201,5     | 1399,8   | 3,1416 | 9,81               | 1,163   |
| Разм.   | м*К / Вт   | Вт/(м <sup>2</sup> *К) | Вт / м     | Вт / м     | Вт / м   | -      | м / с <sup>2</sup> | Вт/ккал |

Рис. 5.5. Фрагмент из файла ДыТр1.

нении теплофизических расчётов котла показатель  $I$  обычно называют энтальпией (теплосодержанием) продуктов сгорания на один кг (нм<sup>3</sup>) сгоревшего топлива.



С учётом изложенного рассмотрим баланс между процессами тепловыделения и тепловосприятия в топке котла:

$$B_p(I_a - I_T) = q_T H_{л}, \quad (5.25)$$

где  $I_a$  и  $I_T$  – тепловыделение в топке и энтальпия газов на её выходе;  $q_T$  – плотность теплового потока на единицу лучевоспринимающей поверхности  $H_{л}$  в топке котла.

С другой стороны в соответствии с законами излучения величина  $q_T$  определяется по формуле (5.2). Тогда на основании (5.23) при температуре газов и их энтальпии на выходе из топки  $t = t_T$  и  $I = I_T$  с учётом (5.25), (5.2) определяем:

$$t_T = \frac{A}{2B} + \left( \frac{A^2}{4B^2} + \frac{I_a B_p - \chi H_{л} (T_a^4 - T_{сэ}^4)}{B_p \rho_{\Gamma}^0 V_{\Gamma} B} \right)^{0,5}, \quad (5.26)$$

где  $T_a = t_a + 273$  – теоретическая температура горения в топке;  $T_{сэ} = t_{сэ} + 273$  – наружная температура экранных труб.

На основании (5.26) с учётом (5.25), (5.2) получаем частную производную:

$$\frac{\partial t_T}{\partial t_{сэ}} = \left( t_T + \frac{A}{2B} \right)^{-1} \frac{2T_{сэ}^3 (I_a - I_T)}{\rho_{\Gamma}^0 V_{\Gamma} B (T_a^4 - T_{сэ}^4)}. \quad (5.27)$$

Применительно к конвективному пучку в газоходе котла средняя плотность теплового потока  $q_T$  определяется формулой (5.2), а среднюю температуру газов выразим так:

$$t_{\Gamma} \approx 0,5(t_T - t_{yx}), \quad (5.28)$$

где  $t_{yx}$  – температура уходящих газов за конвективным пучком.

Далее, аналогичным образом используя уравнение теплового баланса конвективного пучка,

$$B_p(I_T - I_{yx}) = q_k H_k, \quad (5.29)$$

при  $t = t_{yx}$  и  $I = I_{yx}$  с учётом (3.3), (3.28), (3.29) определяем:

$$t_{yx} = \frac{A}{2B} + \left( \frac{A^2}{4B^2} + \frac{I_T B_p - \alpha_k [0,5(t_T + t_{yx}) - t_{ск}] H_{л}}{B_p \rho_{\Gamma}^0 V_{\Gamma} B} \right)^{0,5}. \quad (5.30)$$

На основании (5.30) с учётом (5.3), (5.28), (5.29) определяем частную производную:

$$\frac{\partial t_{yx}}{\partial t_{ск}} = \left\{ 0,5 + \left( t_{yx} + \frac{A}{2B} \right) \frac{\rho_{\Gamma}^0 V_{\Gamma} B (t_T + t_{yx} - 2t_{ск})}{I_T - I_{yx}} \right\}^{-1}. \quad (5.31)$$

По данным измерений и рекомендациям в нормах теплового расчёта котла [51] следует, что наружная температура стенки экранных труб

$t_{cэ} \approx t_{ж} + 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , а труб конвективного пучка –  $t_{cк} \approx t_{ж} + 4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Соответственно  $\partial t_{cэ} \approx \partial t_{ж}$  и  $\partial t_{cк} \approx \partial t_{ж}$ . Тогда, принимая во внимание уравнение (5.24), частные производные (5.27) и (5.21) выразим как функции от изменения температур  $t_a, t_T, t_{cэ}$  и  $t_T, t_{yx}, t_{cк}$  так:

$$\frac{\partial t_T}{\partial t_{ж}} = \frac{4(t_{cэ} + 273)^3 (t_a - t_T) [B(t_a + t_T) + A]}{(2Bt_T + A)[(t_a + 273)^4 - (t_{cэ} + 273)^4]} \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial t_{yx}}{\partial t_{ж}} = \left\{ 0,5 + \frac{(2Bt_{yx} + A)(t_T + t_{yx} - 2t_{cк})}{2(t_T - t_{yx})[B(t_T + t_{yx}) + A]} \right\}^{-1} \quad (5.33)$$

Для газов среднего состава в диапазоне  $t = 100 - 2200 \text{ }^\circ\text{C}$  коэффициенты аппроксимации теплоёмкости  $A = 1,07 \text{ кДж/(кг }^\circ\text{K)}$  и  $B = 1,12 \cdot 10^{-4} \text{ кДж/(кг }^\circ\text{K}^2)$ . В порядке примера принимаем: в топке котла  $t_{cэ} = 220 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_a = 1980 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_T = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ; в конвективном пучке  $t_{cк} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{yx} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_T = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Подставляя значения этих показателей в формулы (5.32) и (5.33) получаем:  $\partial t_T / \partial t_{ж} = 0,01132$ ;  $\partial t_{yx} / \partial t_{ж} = 1,01689$ .

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

Высокая теплопроводность стальных труб в газоходах водогрейных котлов способствует тому, что температура их наружной несущественно отличается от температуры протекающей в ней воды. Во избежание коррозии поверхностей нагрева этот факт следует учитывать при проектировании конвективных пучков на участках газохода с пониженной температурой газов. Как показали исследования, основным «рычагом», позволяющим избежать коррозионноопасную ситуацию в сечениях газохода, является организация прямоочного (по сх. П) движения теплоносителей относительно друг друга. При этом следует учитывать благоприятно низкое соотношение между водяными эквивалентами обоих теплоносителей (газ/вода) равное, порядка 0,02 – 0,03, способствующее равнозначности суммарной теплоотдачи в конвективных поверхностях нагрева, как при противотоке (Z), так и при прямотоке (П). Кроме того, следует принимать во внимание последствия отличительных особенностей процессов теплообмена в топке и конвективном пучке. В частности, изменение температуры воды в экранах топки практически не влияет на температуру уходящих из неё газов. В отличие от этого, изменение температуры воды в конвективном пучке приводит к такому же по величине изменению температуры уходящих газов.

1. Разработана методика расчёта температур газов на выходе из топки и в газоходе котла из учёта их энтальпии и расхода сожжённого топлива.

2. На основании материалов исследования разработаны программные файлы (ТОВ1, 2, 3, ДыТр1 и др.), позволяющие выполнять численные исследования процессов теплообмена в трубе (а также применительно к трубам

конвективных пучков в котлах), охлаждаемой или обогреваемой потоком воздуха или газов.

### 5.3. Анализ распределения разнотемпературных потоков воды в пределах котельной.

Экономичность работы водогрейной котельной зависит в основном от трех факторов, которые могут быть оптимизированы вмешательством персонала: распределения нагрузок  $Q_i$  между  $i$ -ми котлами, температур воды  $t_{к2i}$  на выходе из котлов и загрузки  $G_{pi}$  насосов рециркуляции. Связь между этими факторами (при прочих равных условиях) представим в виде функции

$$f_1(Q_i^{\text{опт}}, t_{к2i}^{\text{опт}}, G_{pi}^{\text{опт}}) = 0. \quad (5.34)$$

Вопрос оптимального распределения нагрузок  $Q_i$  между котлами (применительно к блокам ТЭС) изучался в Западном отделении ВТИ (ныне БелТЭИ) [74]. Основные материалы этих исследований изложены в ряде отчетов института. Разработана специальная программа, позволяющая решать эту задачу на ЭВМ. В качестве исходных данных используется целый перечень фактических и нормативных параметров котлов. В конечном итоге решение задачи сводится к выявлению оптимальных нагрузок между котлами при заданных фактических (до установки оптимального режима) температурах питательной воды на входе.

Применительно к водогрейным котлам эта программа требует введения существенных корректировок, т.к. она не учитывает ряд характерных особенностей этих котлов. В частности известно, что температура воды на выходе из котла при одной и той же нагрузке может быть разной. При этом выдерживается одно условие: сохраняется перепад температур воды на участке от входа до выхода из котла. Эта особенность работы водогрейного котла позволяет существенно влиять на величину КПД брутто его и не учитывать ее – это значит не использовать дальнейшие возможности оптимизации режима работы котельной.

Таким образом, решение задачи оптимизации по программе ВТИ (БелТЭИ) применительно к водогрейным котлам позволяет установить следующую взаимосвязь:

$$f_2(Q_i^{\text{опт}}, t_{к2i}) = 0, \quad (5.35)$$

в которой, в отличие от функции (5.34) температура воды  $t_{к2i}$  на выходе из котла не является оптимальной.

Анализ принципиальной схемы котельной (рис. 5.1) показывает, что при любой нагрузке  $Q_i$  и, в частности, при  $Q_i = Q_i^{\text{опт}}$  имеют место также оптимальные значения и таких показателей, как  $G_{pi}$  и  $t_{к2i}$ . Решение такой задачи по отысканию указанного оптимума сводится к определению функции

$$f_3(Q_i, t_{к2i}^{\text{опт}}, G_{pi}^{\text{опт}}) = 0. \quad (5.36)$$

Таким образом, очевидно, что связь между тремя оптимальными факторами  $Q_i^{\text{опт}}$ ,  $t_{к2i}^{\text{опт}}$ ,  $G_{pi}^{\text{опт}}$ , т.е. функцию (5.34) можно получить путем решения

двух оптимизационных задач в комплексе, т.е. на основании совместного решения уравнения (5.35) и (5.36).

Рассмотрим вопрос оптимизации двух факторов т.е.  $t_{к2i}^{опт}$  и  $G_{pi}^{опт}$  при  $Q_i = const$  в соответствии с функцией (5.36), руководствуясь принципиальной схемой котельной, показанной на рис. 5.1. Из анализа ее следует, что оптимальным является тот режим работы котельной, при котором разрыв между температурами воды на выходе из котла  $t_{к2i}$  и в сети  $t_c$ , а также загрузка насоса рециркуляции  $G_{pi}$  (в расчете на один котел) оказываются как можно меньшими или вовсе равны нулю. Причем, режим работы, при котором загрузка насосов рециркуляции равна нулю, т.е.  $G_{pi} = 0$ , является предпочтительным.

Расход воды  $G_{ci}$  в сети и через бойлера ТЭЦ  $G_{тэци}$  в расчете на один  $i$ -ый котел определим так:

$$\left. \begin{aligned} G_{тэци} &= G_{ci} G_{тэц} G_c^{-1}, \\ G_{ci} &= Q_i C^{-1} \left[ (t_c - t_o) - (t_{тэц} - t_o) G_{тэц} G_c^{-1} \right]^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (5.37)$$

где суммарные расходы воды в сети и через бойлера ТЭЦ в расчете на  $j$  котлов котельной  $G_c = \sum_{i=1}^j G_{ci}$ ,  $G_{тэц} = \sum_{i=1}^j G_{тэци}$ ,  $t_c$ ,  $t_o$ ,  $t_{тэц}$  – температура прямой, обратной воды в сети и на выходе из ТЭЦ.

Температура воды на выходе из котла  $t_{к2i}^p = t_{т1i}^p + Q_i / (C G_{кти})$  должна отвечать условиям надежности его работы и защиты поверхностей нагрева от низкотемпературной коррозии, т.е.

$$t_c \leq t_{к2i}^{\min} \leq t_{к2i}^p \leq t_{к2i}^{\text{пред}}, \quad (5.38)$$

$$t_o \leq t_{т1i}^{\text{доп}} \leq t_{т1i}^p = t_{к2i}^p - Q_i / (C G_{кти}), \quad (5.39)$$

где  $t_{к2i}^{\min}$  – минимально-возможная в данных условиях температура воды на выходе из котла;  $t_{к2i}^{\text{пред}}$  – предельно-максимальная температура нагрева воды в котле, отвечающая его паспортным данным;  $t_{т1i}^{\text{доп}}$  – минимально-допустимая температура воды на выходе в котел по условиям низкотемпературной коррозии. Количественные соотношения между теплоносителями (рис. 5.1)  $G_{ci}$ ,  $G_{тэци}$ ,  $G_{кти}$  в расчете на один котел разделим на три категории:

в 1-ой категории  $G_{тэци} \leq G_{ci} \leq G_{кти}$ ,

во 2-ой категории  $G_{тэци} \leq G_{кти} \leq G_{ci}$ ,

в 3-ей категории  $G_{кти} \leq G_{тэци} \leq G_{ci}$ .

Исследования показатели, что каждая из этих категорий комплекса

теплоснабжения имеет свои оптимальные режимы, зависящие от потоков  $G_{\text{пл}i}$  и  $G_{\text{п}2i}$ . Все остальные потоки воды в трубопроводах котельной согласно схеме на рис. 5.1 являются функциями  $G_{\text{пл}i}$  и  $G_{\text{п}2i}$ .

$$G_{\text{р}i} = G_{\text{кт}i} - G_{\text{с}i} + G_{\text{пл}i} + G_{\text{п}2i} \geq 0, \quad (5.40a)$$

$$G_{\text{от}i} = G_{\text{с}i} - G_{\text{тэ}цi} - G_{\text{пл}i} \geq 0, \quad (5.40б)$$

$$G_{\text{п}3i} = G_{\text{тэ}цi} - G_{\text{п}2i} \geq 0, \quad (5.40в)$$

$$G_{\text{вх}i} = G_{\text{с}i} - G_{\text{пл}i} - G_{\text{п}2i} \geq 0. \quad (5.40г)$$

1-ая категория количественных соотношений теплоносителей  $G_{\text{с}}$ ,  $G_{\text{тэ}ц}$ ,  $G_{\text{кт}}$  (в расчете на один котел, индекс  $i$  опускаем) характерна тем, что она позволяет выдерживать температуру воды  $t_{\text{к}2}$  на выходе из котла равной температуре воды  $t_{\text{с}}$  в сети, т. е.  $t_{\text{к}2} = t_{\text{с}}$ . При этом загрузка насоса рециркуляции  $G_{\text{р}} \geq 0$  и потоки воды  $G_{\text{пл}} = 0$ ,  $G_{\text{п}2} = 0$ . Насос рециркуляции может быть отключен только при  $G_{\text{кт}} = G_{\text{с}}$ . В случае, когда по условиям низкотемпературной коррозии согласно неравенствам (5.38), (5.39)  $t_{\text{к}2}^{\text{р}} > t_{\text{с}}$ , тогда включается насос рециркуляции ( $G_{\text{р}} > 0$ ), а величина потока  $G_{\text{пл}}$  (при  $G_{\text{п}2} = 0$ ), устанавливается равной:

$$G_{\text{пл}} = G_{\text{с}} \frac{t_{\text{к}2}^{\text{р}} - t_{\text{с}}}{t_{\text{к}2}^{\text{р}} - t_{\text{о}}}. \quad (5.41)$$

2-ая и 3-я категории количественных соотношений теплоносителей характеризуются тем, что они предусматривают два разных режима нагрева воды при отключенном насосе рециркуляции ( $G_{\text{р}} = 0$ ): один с минимально возможной температурой  $t_{\text{к}2}^{\text{мин}}$  на выходе из котла, другой –  $t_{\text{к}2}^{\text{макс}}$  – с максимальной. В частности, для 2-ой категории:

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{к}2}^{\text{мин}} &= t_{\text{тэ}ц} + \frac{G_{\text{с}}}{G_{\text{кт}}} (t_{\text{с}} - t_{\text{тэ}ц}), \\ t_{\text{к}2}^{\text{макс}} &= t_{\text{о}} + \frac{G_{\text{с}}}{G_{\text{кт}}} (t_{\text{с}} - t_{\text{о}}). \end{aligned} \right\} \quad (5.42)$$

В случае, когда на основании формулы (5.42) оказывается, что  $t_{\text{к}2}^{\text{мин}} \leq t_{\text{о}} + G_{\text{кт}}^{-1} [G_{\text{с}} (t_{\text{с}} - t_{\text{о}}) - G_{\text{д}ү\text{ö}} (t_{\text{д}ү\text{ö}} - t_{\text{г}})]$ , т.е. вопреки условиям (5.39)  $t_{\text{т}1}^{\text{мин}} = t_{\text{к}2}^{\text{мин}} - G_{\text{кт}}^{-1} [G_{\text{с}} (t_{\text{с}} - t_{\text{о}}) - G_{\text{тэ}ц} (t_{\text{тэ}ц} - t_{\text{о}})] \leq t_{\text{о}}$ , тогда в дальнейших расчетах согласно условиям (5.39) рабочую температуру воды на входе в котел принимаем равной  $t_{\text{т}1}^{\text{р}} \geq t_{\text{о}}$ .

Для 3-ей категории величина  $t_{\text{к}2}^{\text{мин}}$  вычисляется так же, как и для 2-ой категории по формуле (5.42), а температура  $t_{\text{к}2}^{\text{макс}}$ :

$$t_{\text{к}2}^{\text{макс}} = t_{\text{тэ}ц} + \frac{Q}{CG_{\text{кт}}}. \quad (5.43)$$

В том случае, когда согласно условиям (5.38), (5.39), рабочая температура воды  $t_{к2}^p$  на выходе из котла лежит в пределах  $t_{к2}^{\min} \leq t_{к2}^p \leq t_{к2}^{\max}$ , тогда, не включая насос рециркуляции ( $G_p = 0$ ), следует установить следующие значения потоков  $G_{п1}$  и  $G_{п2}$ :

для 2-ой категории

$$\left. \begin{aligned} G_{п1} &= G_{кт} (t_{к2}^p - t_{к2}^{\min}) (t_{тэц} - t_o)^{-1} = \\ &= [G_{кт} (t_{к2}^p - t_{тэц}) - G_c (t_c - t_{тэц})] (t_{тэц} - t_o)^{-1}, \\ G_{п2} &= G_{кт} (t_{к2}^{\max} - t_{к2}^p) (t_{тэц} - t_o)^{-1} = \\ &= [G_c (t_c - t_o) - G_{кт} (t_{к2}^p - t_o)] (t_{тэц} - t_o)^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (5.44)$$

для 3-ей категории величина  $G_{п1}$  вычисляется так же, как и для 2-ой категории по формуле (5.44), а расход потока  $G_{п2}$  равен:

$$\left. \begin{aligned} G_{п2} &= G_{кт} (t_{к2}^{\max} - t_{к2}^p) (t_{тэц} - t_o)^{-1} + G_{тэц} - G_{кт} = \\ &= G_{тэц} - G_{кт} [t_{к2}^p - t_o - Q(CG_{кт})^{-1}] (t_{тэц} - t_o)^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (5.45)$$

В том случае, когда нагрузка котла равна или больше ( $Q \geq Q^{гп}$ ) некоторой условной величины  $Q^{гп} = C[G_{кт} (t_{тэц} - t_o) + G_c (t_c - t_{тэц})]$ , тогда рабочая температура воды  $t_{к2}^p$  лежит в пределах  $t_o + QC^{-1}G_{кт}^{-1} \leq t_{к2}^p \leq t_{к2}^{\max}$ , т.е. согласно (5.39)  $t_{т1} \geq t_o$ .

В случаях, когда по условиям эксплуатации, а также в соответствии с неравенствами (5.38), (5.39)  $t_{к2}^p > t_{к2}^{\max}$ , тогда включается насос рециркуляции ( $G_p > 0$ ) и устанавливаются соответствующие значения потоков  $G_{п1}$  и  $G_{п2}$ , а именно:

для 2-ой категории соотношения теплоносителей:

– если  $t_{к2}^p \leq t_{к2}^{гп} = t_o + G_c (t_c - t_o) G_{тэц}^{-1}$ , тогда величина  $G_{п1}$  вычисляется по формуле (5.41), как для 1-ой категории, а  $G_{п2} = 0$ ;

– если  $t_{к2}^p \geq t_{к2}^{гп}$ , тогда

$$\left. \begin{aligned} G_{п1} &= G_c - G_{тэц}, \\ G_{п2} &= \frac{G_{тэц} (t_{к2}^p - t_o) - G_c (t_c - t_o)}{t_{к2}^p - t_{тэц}}. \end{aligned} \right\} \quad (5.46)$$

Для 3-ей категории соотношения теплоносителей при  $t_{к2}^p > t_{к2}^{\max} = t_{тэц} + Q(CG_{кт})^{-1}$  также включается насос рециркуляции, величина  $G_{п1}$  вычисляется по формуле (5.46), а значение  $G_{п2}$  равно:

$$G_{п2} = \frac{G_c (t_{к2}^p - t_c) - (G_c - G_{тэц}) (t_{к2}^p - t_o)}{t_{к2}^p - t_{тэц}}. \quad (5.47)$$

Изложенные результаты исследования рекомендуются для разработки соответствующих программных средств, позволяющих оптимизировать массовые и температурные потоки по системе теплоснабжения в целом. В основном это касается систем теплоснабжения с водогрейными котлами, работающими в основном и пиковом режиме совместно с ТЭЦ.

В таблице 5.3 приведены результаты примерных расчетов 8- и принципиально возможных режимов работы котельной, состоящей из одного котла типа ПТВМ-100 или КВГМ-100 (рис. 5.1). 7-ой режим, будучи не реальным, приведен лишь с целью сравнения его с остальными режимами. Каждый из 8-и вариантов распределения нагрузок предусматривает следующие условия работы внешней теплосети и ТЭЦ (по 2-ой категории):  $G_c = 3150$  т/ч,  $G_{ТЭЦ} = 1760$  т/ч,  $G_{СК} = 1390$  т/ч,  $G_{КТ} = 2500$  т/ч, наружная температура воздуха  $t_H = -15^\circ\text{C}$ . В теплосети:  $t_c = 122^\circ\text{C}$ ,  $t_{ТЭЦ} = 117,62^\circ\text{C}$ ,  $t_o = 61^\circ\text{C}$ , тепловая нагрузка сети  $Q_c = 192,16$  Гкал/ч = 223,5 МВт,  $Q_{ТЭЦ} = 99,65$  Гкал/ч = 115,9 МВт, тепловая нагрузка котла  $Q_{\dot{\delta}} = 92,5$  Гкал/ч = 107,6 МВт. Абсолютные значения температур  $t_{T1}$  и  $t_{K2}$  в каждом из восьми режимов работы котла разные, однако, перепад этих температур  $\Delta t = t_{K2} - t_{T1} = 37^\circ\text{C}$  во всех случаях одинаковый. Восьмой режим работы котла является оптимальным. Эффективность всех остальных режимов (табл. 5.3) сравнивается с восьмым, т.е.

$$\eta = \eta^{\text{опт}} - \Delta\eta = \eta^{\text{опт}} - K_{yx} (t_{K2}^{\text{опт}} - t_{K2}), \quad (5.48)$$

где при сжигании природного газа  $K_{yx} \approx -0,05 \text{ \% / }^\circ\text{C}$  и соответственно для мазута  $-K_{yx} \approx -0,047 \text{ \% / }^\circ\text{C}$ . Экономия топлива (абсолютная и в %) вычислена по формулам:

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{эк}} &= \Delta b Q_{KT} \cdot 10^{-3}, \text{ т/ч,} \\ \delta &= C_{\text{эк}} \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot (b Q_{KT})^{-1}, \text{ \%} \end{aligned} \right\} \quad (5.49)$$

Данные, приведенные в таблице 5.3, дают представление о величине экономического эффекта (экономия топлива до 1,48 %), который может быть реализован только за счет оптимизации распределения потоков воды (т. е. в данном случае потоков  $G_{T1}$ ,  $G_{T2}$ ) в пределах самой котельной, работающей в пиковом режиме. Ниже на рис. 5.6 (в порядке примера) дана фрагмент из рабочего листа программного файла ВКГ1, позволяющего оптимизировать значения температур и массовых потоков воды в системе теплоснабжения на основании заданных исходных данных. Остальные показатели системы теплоснабжения, включая тепловой режим работы котла, вычисляются по отдельной программе, изложенной в разделе 4.4 главы 4. В соответствии с этим в главе 4 на рис. 4.6а (в порядке примера) дана соответствующая распечатка рабочего листа по результатам теплового расчета котла КВГМ-100, обеспе-

чивающего заданный режим работы системы теплоснабжения, приведенный на рис. 5.6. в главе 5.

Аналогичные результаты примерных расчётов с помощью того же программного файла ВКТ1 даны на рис. 5.7 данной главы 5 и в таблице на рис. 4.6б в главе 4 при работе котла КВГМ-100 в пиковом режиме совместно с ТЭЦ.

Таблица 5.3. Варианты распределения разнотемпературных потоков воды при работе котла КВГМ-100 в пиковом режиме (рис. 5.1) по сравнению с оптимальным (8, опт.). Топливо – природный газ. Нагрузка котла постоянна:  $Q_{\text{эд}} = 92,5$  Гкал /ч.

| Обозн.        | $t_{\text{т1}}$ | $t_{\text{к2}}$ | $t_{\text{вх}}$ | $G_{\text{р}}$ | $G_{\text{п1}}$ | $G_{\text{п2}}$ | $G_{\text{от}}$ | $G_{\text{п3}}$ |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Разм.         | °С              | °С              | °С              | т / ч          | т / ч           | т / ч           | т / ч           | т / ч           |
| 1             | 90,00           | 127,00          | 87,00           | 187,5          | 139,4           | 698,1           | 1250,6          | 1062,0          |
| 2             | 90,00           | 127             | 90              | 0              | 170,5           | 479,5           | 1219,5          | 1059,7          |
| 3             | 100,86          | 137,86          | 90,00           | 567,3          | 447,2           | 770,1           | 942,8           | 989,9           |
| 4             | 100,86          | 137,86          | 100,86          | 0              | 650,0           | 0               | 740,0           | 1760,0          |
| 5             | 113,00          | 150,00          | 85,00           | 1077,0         | 570,1           | 1040,8          | 819,9           | 719,2           |
| 6             | 113,00          | 150,00          | 90,00           | 958,3          | 638,0           | 970,3           | 752,0           | 789,7           |
| 7             | 133,18          | 170,18          | 117,62          | 740,1          | 1390,0          | 0               | 0               | 1760,0          |
| <b>8, опт</b> | <b>86,14</b>    | <b>123,14</b>   | <b>86,14</b>    | <b>0</b>       | <b>0</b>        | <b>650,0</b>    | <b>1390</b>     | <b>1110,0</b>   |

Таблица 5.3. Продолжение.

| $G_{\text{вх}}$ | $\eta$       | b             | $\Delta t_{\text{вх}}$ | $\Delta \eta$ | $\Delta b$ | $\Delta G_{\text{р}}$ | $C_{\text{эк}} \cdot 10^3$ | $\delta$ |
|-----------------|--------------|---------------|------------------------|---------------|------------|-----------------------|----------------------------|----------|
| т / ч           | %            | кг/Гкал       | °С                     | %             | кг/Гкал    | т / ч                 | тут/ч                      | %        |
| 2312,5          | 92,16        | 155,16        | 3,86                   | 0,193         | 0,36       | 187,5                 | 33,30                      | 0,232    |
| 2500,0          | 92,16        | 155,16        | 3,86                   | 0,193         | 0,36       | 0                     | 33,30                      | 0,232    |
| 1932,7          | 91,62        | 156,08        | 14,72                  | 0,736         | 1,28       | 567,3                 | 118,40                     | 0,820    |
| 2500,0          | 91,62        | 156,08        | 14,72                  | 0,736         | 1,28       | 0                     | 118,40                     | 0,820    |
| 1539,1          | 91,01        | 157,13        | 26,96                  | 1,343         | 2,33       | 1077,0                | 215,53                     | 1,483    |
| 1541,7          | 91,01        | 157,13        | 26,86                  | 1,343         | 2,33       | 958,3                 | 215,53                     | 1,483    |
| 1760,0          | 90,00        | 158,90        | 47,04                  | 2,352         | 4,10       | 740,1                 | 379,25                     | 3,580    |
| <b>2500,0</b>   | <b>92,35</b> | <b>154,80</b> | <b>0</b>               | <b>0</b>      | <b>0</b>   | <b>0</b>              | <b>0</b>                   | <b>0</b> |

Программное средство ВКТ1 выполняет расчёт тепловой схемы котельной и системы теплоснабжения в целом в расчёте на один котёл согласно результатам исследования, изложенным выше. Одновременно выполняется тепловой расчёт котла КВГМ-100 в основном (ТСП-О) и в пиковом (ТСП-П) режимах с традиционными схемами питания соответственно по 4-х и 2-х ходовым схемам, предусмотренным проектом. Расчёт режима работы котла выполняется на основании исходных данных, вводимых в программу предварительно при её установке. В частности, вводятся теплофизические характеристики рабочих газов, сжигаемого топлива, данные о конструктивных размерах поверхностей нагрева в топке и газоходе котла, ряд показателей и коэффициентов из норм теплового расчёта [51].

Как видно, данные, приведенные на рис. 5.6 и 5.7 отвечают разным



схемам питания котлов: в режимах с ТСП – О и с ТСП–П. В случае ТСП – О (рис. 5.6) исходными данными для расчёта являются: температура прямой ( $t_c$ ) и обратной ( $t_o$ ) воды в теплосети, тепловая нагрузка котла ( $\Theta_{кТi}$ ), расход воды ( $G_T = G_K$ ) через котёл и температура её ( $t_{T1}$ ) на входе. В случае ТСП – П (рис. 5.7) к этим исходным данным добавляются значение

**ВКТ1** Показатели режимов работы водогрейного котла типа КВГМ с традиц. (4-х ход.) схемой питания в основном режиме (ТСП - О). Опред. массовых потоков и их температур по технологическим трубопроводам. Топливо - мазут. ← Исх. данные

|              |      |   |      |      |      |      |      |      |      |        |      |
|--------------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|
| ОТ А =       | 90,0 | Построение графиков по аргументам А 1 - А 5 |      |      |      |      |      |      |      | ДО А = | 80,0 |
| Расчёт котла | 90,0 | 88,9  | 87,8 | 86,7 | 85,6 | 84,4 | 83,3 | 82,2 | 81,1 | 80,0   |      |
|              | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10     |      |

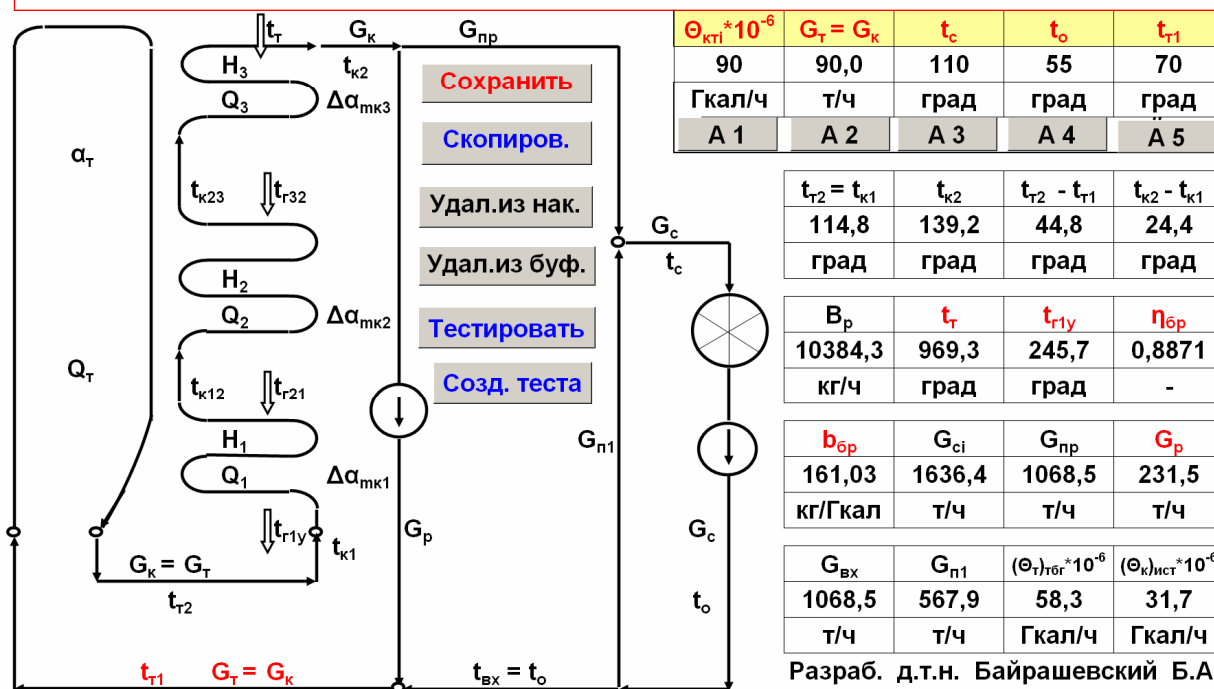


Рис. 5.6. Расчётные показатели системы теплоснабжения при загрузке котла в базовом режиме.

температуры сетевой воды ( $t_{ТЭЦ}$ ) за бойлерами ТЭЦ и долевая составляющая (в расчёте на один котёл) расхода воды от ТЭЦ ( $G_{ТЭЦ}$ ) по отношению к расходу воды в теплосети ( $G_c G_c$ ), т.е.  $g_{ТЭЦ} = G_{ТЭЦ} / G_c$ .

Оптимизация режимов работы котла с ТСП - О сводится к расчёту массовых и тепловых потоков по трубопроводам в пределах котельной при условии, что температура воды на входе в котёл определяется минимально – допустимым значением температуры уходящих газов. В случае ТСП – П к такой оптимизации добавляется задача [70] по отысканию режимов с минимальной загрузкой насоса рециркуляции или при полным его отключении.

Расчёт схемы котельной с ТСП – О котла (при исходных данных, заданных на рис. 5.6) сводится к решению замкнутой системы уравнений и получению однозначных результатов.

В случае ТСП – П (при исходных данных, заданных на рис. 5.7) система уравнений относительно анализируемых показателей не замыкается и

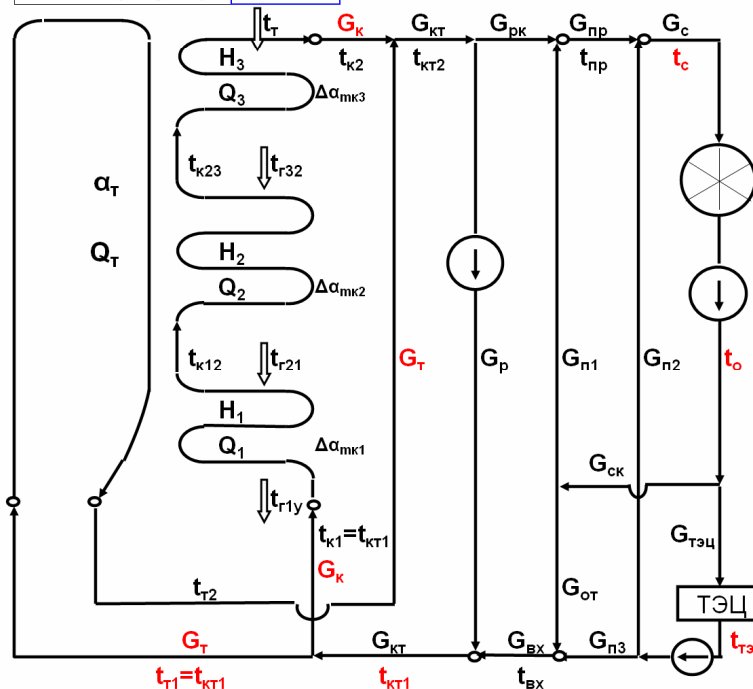
сводится к уравнению  $G_p = f(G_{пi})$ , на основании которого вычисляются предельно допустимые по условиям эксплуатации значения  $G_p^{min}$ ,  $G_p^{max}$  и адекватные им остальные результаты анализа.

Программа предусматривает автоматическое построение графиков, позволяющих изучать влияния ряда факторов на экономичность работы ко-

**ВКТ1** Показатели режимов работы водогрейного котла типа КВГМ с традиц. (2-х ход.) схемой питания в пиковом режиме (ТСП - П). Опред. массовых потоков и их температур по технологическим трубопроводам. Топливо - мазут. X ← Исх. данные

|                      |           |   |               |               |             |                          |                    |          |                         |                           |       |
|----------------------|-----------|---|---------------|---------------|-------------|--------------------------|--------------------|----------|-------------------------|---------------------------|-------|
| ОТ А =               | 90,00     | Построение графиков по аргументам А 1 - А 8 |               |               |             |                          |                    |          |                         | ДО А =                    | 85,00 |
| Рас-<br>чёт<br>котла | 90,00     | 89,44                                       | 88,89         | 88,33         | 87,78       | 87,22                    | 86,67              | 86,11    | 85,56                   | 85,00                     |       |
|                      | 1         | 2   | 3             | 4             | 5           | 6                        | 7                  | 8        | 9                       | 10                        |       |
|                      | Сохранить | Скопировать                                 | Удал. из нак. | Удал. из буф. | Тестировать | Созд. теста              |                    |          |                         |                           |       |
| $G_{тэц}$            | $t_c$     | $t_{тэц}$                                   | $t_o$         | $G_k$         | $G_T$       | $\Theta_{кот} * 10^{-6}$ | $t_{r1} = t_{кт1}$ | $t_{r2}$ | $\Theta_{сi} * 10^{-6}$ | $\Theta_{тэцi} * 10^{-6}$ |       |
| 0,500                | 110,0     | 80,0  | 55,0          | 1200,0        | 1300,0      | 90,00                    | 75,0               | 119,2    | 116,47                  | 26,47                     |       |
| -                    | град      | град  | град          | т/ч           | т/ч         | Гкал/ч                   | град               | град     | Гкал/ч                  | Гкал/ч                    |       |
| А 1                  | А 2       | А 3   | А 4           | А 5           | А 6         | А 7                      | А 8                | min      | max                     |                           |       |

|                 |            |          |                    |                               |           |         |   |           |             |          |
|-----------------|------------|----------|--------------------|-------------------------------|-----------|---------|---|-----------|-------------|----------|
| $G_{сi}$        | $G_{тэцi}$ | $G_{КТ}$ | $t_{к1} = t_{кт1}$ | $t_{к2}$                      | $t_{кт2}$ | $B_p$   | $t_r$   | $t_{r1y}$ | $\eta_{бр}$ | $b_{бр}$ |
| 2117,6          | 1058,8     | 2500,0   | 75,0               | 102,1                         | 111,0     | 10217,2 | 963,9   | 213,1     | 0,9016      | 158,4    |
| т/ч             | т/ч        | т/ч      | град               | град                          | град      | кг/ч    | град  | град      | -           | кг/Гкал  |
| $C =$           | 0,001      | $G_{п1}$ | КОР                | Корректировка показат. поиска |           |         | Варианты загрузки (min, max) насоса рециркуляции. |           |             |          |
| Гкал / (т*град) |            | 10,0     |                    |                               |           |         |   |           |             |          |



|             |          |          |                          |
|-------------|----------|----------|--------------------------|
| Обозн.      | $G_p$    | $G_{п1}$ | $G_{п2}$                 |
| $G_p^{min}$ | 420,2    | 37,8     | 0,0                      |
| $G_p^{max}$ | 450,7    | 0,0      | 68,3                     |
| Разм.       | т/ч      | т/ч      | т/ч                      |
| Обозн.      | $G_{п3}$ | $G_{рк}$ | $G_{пр}$                 |
| $G_p^{min}$ | 1058,8   | 2079,8   | 2117,6                   |
| $G_p^{max}$ | 990,5    | 2049,3   | 2049,3                   |
| Разм.       | т/ч      | т/ч      | т/ч                      |
| Обозн.      | $G_{ск}$ | $G_{от}$ | $G_{вх}$                 |
| $G_p^{min}$ | 1058,8   | 1021,0   | 2079,8                   |
| $G_p^{max}$ | 1058,8   | 1058,8   | 2049,3                   |
| Разм.       | т/ч      | т/ч      | т/ч                      |
| Обозн.      | $t_{пр}$ | $t_{вх}$ | $\Theta_{п12} * 10^{-6}$ |
| $G_p^{min}$ | 110,0    | 67,7     | 2,08                     |
| $G_p^{max}$ | 111,0    | 67,1     | 5,46                     |
| Разм.       | град     | град     | Гкал/ч                   |

Разр. д.т.н. Байрашевский Б.А.

Рис. 5.7. Расчётные показатели системы теплоснабжения при загрузке котла в пиковом режиме.

тельной в целом, и может быть рекомендована для выполнения исследовательских, проектно – конструкторских, наладочных и других работ в условиях производства. Результаты расчётов, приведенные в порядке примеров на рис. 5.6, 5.7 могут быть использованы при оптимизации нагрузок между котлами. При работе котлов в пиковом режиме (рис. 5.7) программа позволяет определить такой вариант распределения потоков воды в пределах ко-

тельной, при котором насос рециркуляции работает с минимальной нагрузкой ( $G_p^{\min}$ ), либо отключён совсем.

### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

Оптимальное распределение разнотемпературных потоков в системе теплоснабжения предусматривает соблюдение предельно-минимальных значений температур на входе и выходе из котла в зависимости от его тепловой нагрузки и значений температур прямой и обратной воды в теплосети. Поэтому решение такой задачи сопряжено с тепловым расчётом котла и схемы теплоснабжения в целом. Разработанное в порядке примера программное средство по оптимизации температурных режимов системы теплоснабжения подтверждает эффективность такого мероприятия в условиях эксплуатации. В результате на основании анализа режимов работы комплекса «котельная – теплосеть» можно констатировать:

1. Оптимизация температурного режима системы теплоснабжения с котлом, работающим в базовом режиме, сводится в основном к определению минимальной величины загрузки насоса рециркуляции.
2. Оптимизация температурного режима системы теплоснабжения с котлом, работающим в пиковом режиме, позволяет определить два варианта его работы: с максимальной и с минимальной загрузкой насосов рециркуляции.
3. Оптимизация режимов работы системы теплоснабжения предусматривает уменьшение до минимума разрывов между значениями температур воды на выходе из котла и в прямой теплосети.
4. Определены три категории режимов работы комплекса теплоснабжения, каждый из которых (в расчете на один котел) характеризуется определенными соотношениями расходов воды в сети, через бойлера ТЭЦ и через котел.

#### 5.4. Распределение нагрузок между котлами в пределах котельной.

Для одновременной оптимизации третьего фактора  $Q_i^{\text{опт}}$  согласно функции (5.34) и в соответствии с материалами, изложенными выше, воспользуемся общим выражением по расчету среднеинтегрального значения удельного расхода топлива "b" по котельной в целом. При заданной тепловой нагрузке котельной  $Q_{\text{к.т}} = \sum Q_i$  минимизацию топливных затрат, в частности, среднего удельного расхода топлива по котельной проще всего контролировать на основании формулы:

$$b = \sum_{i=1}^j (Q_i b_i) \left( \sum_{i=1}^j Q_i \right)^{-1}, \quad (5.50)$$

где  $b_i = \eta_i^{-1} Q_{\text{о}}$  – удельный расход топлива;  $\eta_i^{-1}$  – КПД брутто котла;  $Q_y$  – теплота сгорания условного топлива.

В соответствии с этим расчётный показатель b по котельной в целом



По 1-му методу аппроксимационную функцию  $\eta_i = f(Q_i)$ , входящую в систему уравнений (5.52), (5.53) выразим в виде полинома, либо в виде прямой, что в диапазоне нагрузок от 40 до 100% с небольшой погрешностью запишем так:

$$\eta_i = a_i Q_i Q_{Hi}^{-1} + C_i, \quad (5.54)$$

$$C_i = v_i + C_{Hi}(t_{Hi} - t_{Ho_i}) + C_{Tli}(t_{Tli} - t_{Tlo_i}). \quad (5.55)$$

Здесь  $Q_{i}$  – номинальная нагрузка котла;  $a_i$ ,  $v_i$  – коэффициенты аппроксимации, установленные по исходно-нормативным характеристикам котла при значениях температур воздуха  $t_{Ho_i}$ , подаваемого на горение, и воды на входе в котёл  $t_{Tlo_i}$ . Поправки на фактические значения этих температур, т. е. воздуха  $t_{Hi}$  и воды  $t_{Tli}$  вводятся в формулу (5.55) с помощью эмпирических коэффициентов  $C_{Hi}$  и  $C_{Tli}$ .

Применительно к двум котлам согласно (5.52) и (5.54) имеем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 2\eta_1^{-1}(1 - \eta_1^{-1} a_1 Q_1 Q_{H1}^{-1}) - \bar{b} &= 0, \\ 2\eta_2^{-1}(1 - \eta_2^{-1} a_2 Q_2 Q_{H2}^{-1}) - \bar{b} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.56)$$

В результате решения системы (5.56) относительно аргумента  $Q_1$  с учётом (5.54) и (5.55) при  $i = 1$  и  $i = 2$ , а также имея в виду, что  $Q_{KT} = Q_1 + Q_2$ , определяем расчётные формулы по выявлению оптимальных нагрузок  $Q_1 = Q_1^{OPT}$  и  $Q_2 = Q_2^{OPT}$  между двумя котлами, а именно:

$$\left. \begin{aligned} Q_1^{OPT} &= -0,5\beta/\alpha + [(0,5(\beta/\alpha)^2 - \gamma/\alpha]^{0,5}, \\ Q_2^{OPT} &= Q_{KT} - Q_1^{OPT}, \end{aligned} \right\} \quad (5.57)$$

где при  $i = 1$  и  $i = 2$ , обозначив  $A_i = a_i Q_{Hi}^{-1}$ ,

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= A_2^2 C_1 - A_1^2 C_2 \\ \beta &= -2 \cdot C_1 [A_2 (Q_{KT} A_2 + C_2) + A_1 C_2], \\ \gamma &= C_1 [Q_{KT} A_2 (Q_{KT} A_2 + 2 \cdot C_2) + C_2 (C_2 - C_1)]. \end{aligned} \right\} \quad (5.58)$$

В таблицах 5.4 и 5.5 даны выкопировки из рабочего листа программного файла ОПТВ1, позволяющего оптимизировать тепловые нагрузки водогрейных котлов, работающих в котельной на одну сеть. В таблице 5.4 приведены результаты оптимизации нагрузок между двумя котлами ( $Q_1 = Q_1^{OPT} = 87,2$  Гкал/ч и  $Q_2 = Q_2^{OPT} = 52,8$  Гкал/ч), полученные двумя способами. 1-ый способ основан на определении минимального значения удельного расхода топлива в среднем по котельной, вычисляемого по формуле (5.50). Для этого используется соответствующая операционная система компьютера по отысканию минимума исследуемой функции при определённых огра-

ОПТВ1 | Оптимизация суммарных ( $\Sigma Q_{i=1-j} = 140$ ) Гкал / ч = 162,8 МВт)

2.Решение задачи | тепловых нагрузок 2-х водогрейных котлов.

1.Решение задачи | Сохр. Мод.2А | Восст. Мод.2А | Сохр. Мод.2Б | Восст. Мод.2Б

$j = 2$  | Принципиальное решение задачи основано на системе уравнений:  $\phi_i - b = 0$ .

"ин" – исходно-нормативные данные; "ф" и "опт" – показатели до и после оптимизации.

| $\Sigma \eta_i^{-1} =$ |         | 1/%    |        | ф      |                         | 0,022  |  | $\Sigma K_i =$ |  | 1/% |  | ф   |  | 0,00 |  | $b =$ |  | 1/% |  | ф   |  | 0,02 |  |
|------------------------|---------|--------|--------|--------|-------------------------|--|--|----------------|--|-----|--|-----|--|------|--|-------|--|-----|--|-----|--|------|--|
|                        |         | 1/%    |        | опт    |                         | 0,022  |  |                |  | 1/% |  | опт |  | 0,00 |  |       |  | 1/% |  | опт |  | 0,02 |  |
| Обозн.                 | Разм.   | Обозн. | $i_1$  | $i_2$  | $\Sigma P_{\text{кот}}$ | По котельной: $\Sigma Q_{i=1-j} = Q = Q_1 + Q_2 = Q_1^{\text{опт}} + Q_2^{\text{опт}}$ ; $\phi_i - b = 0$ , где $b = \Sigma \eta_i^{-1} - \Sigma K_i$ ; $K_i = a_i Q_i \eta_i^{-2} Q_{\text{ни}}^{-1}$ ; $b = \Sigma \eta_i^{-1} - \Sigma K_i$ ; $K_i = a_i Q_i \eta_i^{-2} Q_{\text{ни}}^{-1}$ ; $\phi_i = 2\eta_i^{-1}(1 - a_i Q_i \eta_i^{-1} Q_{\text{ни}}^{-1})$ ; $\eta_i = a_i Q_i / Q_{\text{ни}} + C_i$ ; $C_i = V_i + C_{\text{ни}}(t_{\text{ни}} - t_{\text{нои}}) + C_{\text{т1и}}(t_{\text{т1и}} - t_{\text{т1ои}})$ .<br>$\delta_i = 100 \cdot (\phi_i - b) / b$ . |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $Q_i^{\text{max}}$     | Гкал/ч  | ин     | 100,0  | 100,0  | По котельной в целом    | 1-ый и наиболее рациональный способ решения задачи основан на определении минимума функции $b = (\Sigma b_i Q_i) / \Sigma Q_i$ с помощью оператора "Поиск решения" при определённых граничных условиях.  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $Q_{\text{ни}}$        | Гкал/ч  | ин     | 90,0   | 90,0   |                         | 2-ой способ решения – на основании квадратного уравнения относительно $Q_i^{\text{опт}}$ : $\alpha (Q_1^{\text{опт}})^2 + \beta Q_1^{\text{опт}} + \gamma = 0$ , где $\alpha = A_2^2 B_1 - A_1^2 B_2$ . $A_1 = -0,015$ $A_2 = -0,052$  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $G_{\text{кт}}$        | т/ч     | ин     | 1200   | 1300   |                         | $\beta = -2 B_1 [A_1 B_2 + A_2 (A_2 Q + 2 B_2)]$ ; $\gamma = B_1 [A_2 Q (A_2 Q + 2 B_2) + B_2 (B_2 - B_1)]$ ; $Q_1^{\text{опт}} = -0,5 \beta \alpha^{-1} + [0,25 \beta^2 \alpha^{-2} - \gamma \alpha^{-1}]^{0,5}$  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $a_i$                  | %       | ин     | -1,32  | -4,64  |                         | $\alpha = 0,23$ Соответственно: $Q_2^{\text{опт}} = Q - Q_1^{\text{опт}}$ .  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $V_i$                  | %       | ин     | 93,9   | 96,64  |                         | $\beta = 1104$   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $C_{\text{ни}}$        | %/°C    | ин     | 0,043  | 0,044  |                         | $\gamma = -97944$  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $t_{\text{ни}}$        | °C      | ф      | -15,0  | -15,0  |                         | $Q_1^{\text{опт}} = 87,2$ Гкал/ч   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $t_{\text{нои}}$       | °C      | ин     | 15,0   | 15,0   |                         | $Q_2^{\text{опт}} = 52,8$ Гкал/ч   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $C_{\text{т1и}}$       | %/°C    | ин     | -0,041 | -0,040 |                         | $Q_1^{\text{опт}} = 101,4$ МВт   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $t_{\text{т1и}}$       | °C      | ф      | 68,0   | 65,0   |                         | $Q_2^{\text{опт}} = 61,42$ МВт   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $t_{\text{т1ои}}$      | °C      | ин     | 70,0   | 70,0   |                         | В целом по котельной: отклонение ( $\Delta P_{\text{кот}}$ ) фактич. указ. до оптимизации ("ф") от оптимальных ("опт")   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $C_i$                  | %       | ф      | 92,69  | 95,52  |                         |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $\phi_i$               | 1/%     | ф      | 0,022  | 0,023  |                         |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
|                        |         | опт    | 0,022  | 0,022  |                         |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $K_i$                  | 1/%     | ф      | 0,00   | 0,00   |                         |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
|                        |         | опт    | 0,00   | 0,00   |                         |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $\delta_i$             | %       | ф      | -1,23  | 1,23   |                         |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
|                        |         | опт    | 0,00   | 0,00   |                         |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $Q_i$                  | Гкал/ч  | ф      | 70,0   | 70,0   | 140,0                   | ПРИМЕЧАНИЕ: В случае оптимизации нагрузок котлов с одинаковыми (по коэффициентам) нормативными характеристиками решение задачи обоими способами не имеет смысла.   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
|                        |         | опт    | 87,2   | 52,8   |                         | $\Delta = 100 \cdot (V_{\text{ф}} - V_{\text{опт}}) / V_{\text{ф}} = 0,15$ %   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $t_{k2i}$              | °C      | ф      | 126,3  | 118,8  | 122,6                   | $\Delta t_{k2} = t_{k2}^{\text{ф}} - t_{k2}^{\text{опт}} = -4,85$ °C   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
|                        |         | опт    | 140,7  | 105,6  | 127,4                   |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $\eta_i$               | %       | ф      | 91,67  | 91,91  | 91,79                   | $\Delta \eta = \eta_{\text{ф}} - \eta_{\text{опт}} = -0,14$ %  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
|                        |         | опт    | 91,41  | 92,8   | 91,93                   |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $b_i$                  | кг/Гкал | ф      | 155,8  | 155,4  | 155,6                   | $\Delta b = b_{\text{ф}} - b_{\text{опт}} = 0,24$ кг/Гкал  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
|                        |         | опт    | 156,3  | 153,9  | 155,4                   |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
| $V_i$                  | т/ч     | ф      | 10,9   | 10,9   | 21,8                    | $\Delta V = V_{\text{ф}} - V_{\text{опт}} = 0,034$ т/ч   |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |
|                        |         | опт    | 13,6   | 8,1    | 21,8                    |  |  |                |  |     |  |     |  |      |  |       |  |     |  |     |  |      |  |

ничениях значений расчётных показателей  $Q_1$  и  $Q_2$ . 2-ой способ – путём непосредственных расчётов по формулам (5.57), (5.58). Как видно, результаты решения обоими способами оптимизации совпадают. В случае оптимизации котельной с 3-мя, 4-мя, 5-ю и более котлами 2-ой способ аналитического решения задачи значительно усложняется, т. к. приводит к уравнениям 3-ей, 4-ой и 5-ой степеней относительно аргумента  $Q_1$  соответственно. Поэтому при числе котлов в котельной  $j > 2$  в программном файле ОПТВ1 используется только 1-ый способ решения задачи, как это приведено в таблице 5.4.

Здесь следует обратить внимание на одну особенность решения системы уравнений (5.52). В математическом плане она позволяет вычислять  $j$  экстремальных значений определяющих её аргументов  $Q_i^{\text{опт}} > 0$ , отвечаю-

Таблица 5.5. Оптимизация тепловых нагрузок в котельной с 5-ю котлами.

ОПТВ1 | Оптимизация суммарных ( $\Sigma Q_{i=1-j} = 380$ ) Гкал / ч = 441,9 МВт) тепловых нагрузок 5-и водогрейных котлов.

Решение задачи | Сохр. Мод.5А | Восст. Мод.5А | Сохр. Мод.5Б | Восст. Мод.5Б

j = 5 | Принципиальное решение задачи основано на системе уравнений:  $\phi_i - b = 0$ . "ин" – исходно-нормативные данные; "ф" и "опт" – показатели до и после оптимизации.

| $\Sigma \eta_i^{-1} =$ |         | 1/%    | ф      | 0,022  |        |        |        |                  |   | $\Sigma K_i =$ | 1/% | ф   | 0,00 |  |  | b = | 1/% | ф   | 0,02 |  |
|------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|---|----------------|-----|-----|------|--|--|-----|-----|-----|------|--|
|                        |         | 1/%    | опт    | 0,022  |        |        |        |                  |   |                | 1/% | опт | 0,00 |  |  |     | 1/% | опт | 0,02 |  |
| Обозн.                 | Разм.   | Обозн. | $i_1$  | $i_2$  | $i_3$  | $i_4$  | $i_5$  | $\Sigma P_{кот}$ | По котельной:   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $Q_i^{max}$            | Гкал/ч  | ин     | 100,0  | 100,0  | 100,0  | 100,0  | 100,0  | 380,0            | $\Sigma Q_{i=1-j} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 =$<br>$Q_1^{опт} + Q_2^{опт} + Q_3^{опт} + Q_4^{опт} + Q_5^{опт}$<br>1. Система уравнений $\phi_i - b = 0$ используется только для опред. показат. $\delta_i = 100(\phi_i - b) / b$<br>$b = \Sigma \eta_i^{-1} \cdot \Sigma K_i$ ; $K_i = a_i Q_i \eta_i^{-2} Q_{ни}^{-1}$<br>$\phi_i = 2\eta_i^{-1}(1 - a_i Q_i \eta_i^{-1} Q_{ни}^{-1})$<br>$\eta_i = a_i Q_i / Q_{ни} + C_i$<br>$C_i = B_i + C_{ни}(t_{ни} - t_{нои}) + C_{т1i}(t_{т1i} - t_{т1oi})$<br>2. В случае 3-х и более котлов в котельной реш. задачи основано на опред. минимума функции $b = (\Sigma b_i Q_i) / \Sigma Q_i$ оператором "Поиск решения" при опред. граничных условиях.<br>Отклонение ( $\Delta P_{кот}$ ) фактич. показат. до оптимизации ("ф") от оптимальных ("опт") |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $Q_{ни}$               | Гкал/ч  | ин     | 100,0  | 100,0  | 100,0  | 100,0  | 100,0  |                  | ↓ По котельной в целом  |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $G_{кт}$               | т/ч     | ин     | 1200   | 1300   | 1400   | 1350   | 1250   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $a_i$                  | %       | ин     | -1,32  | -4,64  | -3,25  | -4,12  | -2,51  |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $B_i$                  | %       | ин     | 93,8   | 96,64  | 92,5   | 92,1   | 91,5   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $C_{ни}$               | %/°C    | ин     | 0,044  | 0,043  | 0,042  | 0,041  | 0,039  |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $t_{ни}$               | °C      | ф      | -15,0  | -15,0  | -15,0  | -15,0  | -15,0  |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $t_{нои}$              | °C      | ин     | 15,0   | 15,0   | 15,0   | 15,0   | 15,0   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $C_{т1i}$              | %/°C    | ин     | -0,041 | -0,040 | -0,042 | -0,038 | -0,040 |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $t_{т1i}$              | °C      | ф      | 72,0   | 68,0   | 70,0   | 67,0   | 73,0   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $t_{т1oi}$             | °C      | ин     | 70,0   | 70,0   | 70,0   | 70,0   | 70,0   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $C_i$                  | %       | ф      | 92,40  | 95,43  | 91,24  | 90,98  | 90     |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $\phi_i$               | 1/%     | ф      | 0,022  | 0,023  | 0,023  | 0,024  | 0,023  |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
|                        |         | опт    | 0,022  | 0,023  | 0,023  | 0,023  | 0,023  |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $K_i$                  | 1/%     | ф      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
|                        |         | опт    | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $\delta_i$             | %       | ф      | -1,28  | 1,28   | 2,91   | 4,95   | 3,64   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
|                        |         | опт    | -1,64  | 1,64   | 1,64   | 1,64   | 1,64   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $Q_i$                  | Гкал/ч  | ф      | 75,0   | 80,0   | 70,0   | 73,0   | 82,0   | 380,0            | $\Delta = 100 \cdot (B_{ф} - B_{опт}) / B_{ф} = 0,35 \%$  |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
|                        |         | опт    | 100,0  | 94,4   | 68,0   | 50,5   | 67,1   |                  |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $t_{к2i}$              | °C      | ф      | 134,5  | 129,5  | 120,0  | 121,1  | 138,6  | 129,1            | $\Delta t_{к2} = t_{к2}^{ф} - t_{к2}^{опт} = -4,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
|                        |         | опт    | 155,3  | 140,6  | 118,6  | 104,4  | 126,7  | 133,3            |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $\eta_i$               | %       | ф      | 91,41  | 91,72  | 88,97  | 87,98  | 88,15  | 89,6             | $\Delta \eta = \eta_{ф} - \eta_{опт} = -0,3 \%$   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
|                        |         | опт    | 91,08  | 91,05  | 89,03  | 88,9   | 88,53  | 90               |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $b_i$                  | кг/Гкал | ф      | 156,3  | 155,8  | 160,6  | 162,4  | 162,1  | 159,4            | $\Delta b = b_{ф} - b_{опт} = 0,6 \text{ кг/Гкал}$  |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
|                        |         | опт    | 156,9  | 156,9  | 160,5  | 160,7  | 161,4  | 158,8            |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
| $B_i$                  | т/ч     | ф      | 11,7   | 12,5   | 11,2   | 11,9   | 13,3   | 60,6             | $\Delta B = B_{ф} - B_{опт} = 0,2 \text{ т/ч}$  |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |
|                        |         | опт    | 15,7   | 14,8   | 10,9   | 8,1    | 10,8   | 60,4             |   |                |     |     |      |  |  |     |     |     |      |  |

щих только одному условию:  $Q_{кт} = \sum_{i=1}^j Q_i$ . При этом достоверность реше-

ний каждого i-го уравнения в системе (5.52) определяется показателями, которые должны быть равными нулю:  $\delta_i = 100 (\phi_i - b) b^{-1} \rightarrow 0$ , где по аналогии с (5.56)  $\phi_i = 2\eta_i^{-1} (1 - \eta_i^{-1} a_i Q_i Q_{ни}^{-1})$ . Такой факт имеет место в примерной таблице 5.4 (j = 2):  $\delta_1 = \delta_1 = \delta_2 \rightarrow 0$ , т. е. здесь минимум показателя b, вычисленный на основании формулы (5.50), лежит в пределах, предусмотренных ограничений, определяющих физический смысл исследуемых аргументов:  $Q_1^{опт} \geq Q_1 > 0$  и  $Q_2^{опт} \geq Q_2 > 0$ .

В случае примерного расчёта, приведенного в таблице 2 ( $j = 5$ ), минимум показателя  $b$ , установленный по той же формуле (5.50), отвечает аналогичным ограничениям, в частности,  $Q_1^{\text{опт}} \geq Q_1 > 0$ ,  $Q_2^{\text{опт}} \geq Q_2 > 0$ ,  $Q_3^{\text{опт}} \geq Q_3 > 0$ ,  $Q_4^{\text{опт}} \geq Q_4 > 0$  и  $Q_5^{\text{опт}} \geq Q_5 > 0$ , но не удовлетворяет исходной системе уравнений (5.52), т. е. не соответствует экстремуму функции (5.50), т. к. в данном случае  $\delta_i \neq 0$ .

Далее рассмотрим 2-ой метод решения системы уравнений (5.52), основанный, как уже отмечалось, на анализе полуэмпирической формулы Я.П. Пекера [10] по расчёту балансовых потерь  $q_2$ . В отличие от 1-го метода здесь дополнительно учитываются влияния отклонений от норм избытков воздуха в уходящих газах  $\Delta\alpha_{yx}$  и их температуры  $\Delta t_{yx}$ , циркуляции воды в котле  $\Delta G_{\text{кт}}$  и степени загрязнения поверхностей нагрева  $\Delta \xi$ . Кроме того, здесь большая роль отводится организации систематического мониторинга эксплуатационных показателей котла для выявления необходимых констант в формулах аппроксимации. В конечном итоге на основании исходно-нормативных характеристик определяется фактический КПД брутто котла  $\eta_i$  с учётом влияния на него отклонений от базовых норм фактических балансовых составляющих  $\Delta q_{2i} = q_{2i} - q_{20i}$ ,  $\Delta q_{3i} = q_{3i} - q_{30i}$ ,  $\Delta q_{4i} = q_{4i} - q_{40i}$ ,  $\Delta q_{5i} = q_{5i} - q_{50i}$ , т. е.:

$$\eta_i = \eta_{0i} - \Delta q_{2i} - \Delta q_{3i} - \Delta q_{4i} - \Delta q_{5i}, \quad (5.59)$$

где  $\eta_{0i}$  – исходно-нормативное значение КПД брутто котла; для газомазутных котлов можно считать:  $q_{3i} = q_{4i} \approx 0$ ,  $\Delta q_{3i} = \Delta q_{4i} \approx 0$ ; значения балансовых составляющих  $q_{5i}$  и  $q_{50i}$ , как показали испытания [75], практически не зависят от нагрузки котла и определяются известными методами. Таким образом, решение задачи по определению фактического КПД брутто котла  $\eta_i$  сводится, в основном, к вычислению отклонения показателя  $\Delta q_{2i}$ ,

На основании формулы Пекера Я.П. [10] вычисляем исходно-нормативное значение (инд. «о») балансовой составляющей  $q_{20}$  (инд. «i» опускаем)

$$q_{20} = (K\alpha_{yxo} + C) \left( t_{yxo} - \frac{\alpha_{yxo} t_{xво}}{\alpha_{yxo} + B} \right) A_{to} K_Q \cdot 10^{-2} \quad (5.60)$$

и выполняем анализ следующих функций:

$$q_2 = f(t_{yx}, \alpha_{yx}, t_{xв}), \quad (5.61)$$

$$t_{yx} = f(t_{т1}, G_{\text{кт}}, \alpha_{yx}, \xi), \quad (5.62)$$

где  $t_{xв}$ ,  $t_{yx}$ ,  $t_{т1}$  – фактические значения температуры холодного воздуха, уходящих газов и воды на входе в котел;  $\alpha_{yx}$ ,  $\xi$  – коэффициенты избытка воздуха в уходящих газах и загрязнения поверхностей нагрева котла;  $G_{\text{кт}}$  –



массовый расход воды через котёл.

На основании (5.61), (5.62), запишем:

$$\Delta q_2 = q_2 - q_{20} = \frac{\partial q_2}{\partial t_{yX}} \left( \frac{\partial t_{yX}}{\partial t_{T1}} \Delta t_{T1} + \frac{\partial t_{yX}}{\partial G_{KT}} \Delta G_{KT} + \right. \\ \left. + \frac{\partial t_{yX}}{\partial \alpha_{yX}} \Delta \alpha_{yX} + \frac{\partial t_{yX}}{\partial \xi} \Delta \xi \right) + \frac{\partial q_2}{\partial \alpha_{yX}} \Delta t_{yX} + \frac{\partial q_2}{\partial t_{XB}} \Delta t_{XB} \quad (5.63)$$

где  $\Delta t_{T1} = t_{T1} - t_{T10}$ ,  $\Delta G_{KT} = G_{KT} - G_{KT0}$ ,  $\Delta \alpha_{yX} = \alpha_{yX} - \alpha_{yX0}$ ,  $\Delta t_{yX} = t_{yX} - t_{yX0}$ ,  $\Delta t_{XB} = t_{XB} - t_{XB0}$ .

На основании формулы (5.60) вычисляем частные производные из учёта исходно-нормативных показателей, входящие в формулу (5.63):

$$\frac{\partial q_2}{\partial t_{yX}} = \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{yX}} \right)_0 = \\ = 10^{-2} K_Q (K \alpha_{yX0} + C) \left[ 0,00013 \left( 2t_{yX0} - \frac{\alpha_{yX0} t_{XB0}}{\alpha_{yX0} + B} \right) + 0,9805 \right], \quad (5.64)$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t_{XB}} = \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{XB}} \right)_0 = -10^{-2} A_t K_Q (K \alpha_{yX0} + C) \frac{\alpha_{yX0}}{\alpha_{yX0} + B}, \quad (5.65)$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial \alpha_{yX}} = \left( \frac{\partial q_2}{\partial \alpha_{yX}} \right)_0 = 10^{-2} A_t K_Q \left\{ K \alpha_{yX0} - t_{XB0} \left[ \frac{K \alpha_{yX0}}{\alpha_{yX0} + B} + \frac{B (K \alpha_{yX0} + C)}{(\alpha_{yX0} + B)^2} \right] \right\}. \quad (5.66)$$

Значения параметров  $\alpha_{yX0}$ ,  $t_{yX0}$  и частные производные  $\partial t_{yX} / \partial t_{T1}$ ,  $\partial t_{yX} / \partial G_{KT}$ ,  $\partial t_{yX} / \partial \alpha_{yX}$ , входящие в формулы (5.60), (5.63) – (5.66) определяются при составлении исходно-нормативных характеристик котла и могут быть представлены в виде полиномов, как функции его безразмерной нагрузки, т. е. переменной  $q = Q/Q_H$ . В общем виде каждая из этих функций представляется в виде:

$$F(q) = K_0 + \sum_{i=1}^j K_i q^i, \quad (5.67)$$

где значения постоянных коэффициентов  $K_0$ ,  $K_i$  и число их  $j$  определяются на основании аппроксимации соответствующих исходно-нормативных зависимостей [10, 76 – 78], устанавливаемых путём целенаправленных испытаний, либо путём организации систематического мониторинга в период эксплуатации котлов.

Производную  $\partial t_{yX} / \partial \xi$ , входящую в расчётную формулу (5.63), отождествляем с уравнением теплопередачи через загрязнённую стенку котла от газов к воде. В сущности, это средняя плотность теплового потока  $q_{TP}$ , поступающего от газов к воде через поверхности нагрева котла:

$$\partial t_{yx} / \partial \xi = -(t_{yx} - t_B^{cp}) K_q = q_{ТП}, \quad (5.68)$$

где  $t_B^{cp}$  и  $t_{yx}$  – средние значения температур воды и газов в котле,  $K_q$  – коэффициент теплопередачи от газов к воде.

На основании результатов исследования [73] известно, что в конвективном пучке котла  $\partial t_{yx} / \partial t_{ж} = 0,99 - 1,04$ , т. е. согласно уравнению (5.68) производная  $\partial t_{yx} / \partial \xi = q_{ТП} \approx \text{const}$ . Очевидно, что также постоянной и не зависящей от нагрузки (при исследуемом фактическом состоянии котла) является степень загрязнения поверхностей нагрева, т.е.  $\Delta \xi = \text{const}$ . Следовательно, с небольшой погрешностью можно считать, что в расчётном уравнении (5.63) комплекс  $(\partial t_{yx} / \partial \xi) \Delta \xi = \text{const}$ . Его можно вычислить на основании той же формулы (5.63) и определить, как результат неоднократного анализа показателей двух произвольных режимов работы котла с небольшим разрывом во времени ( $\Delta \tau = \tau' - \tau''$ ), определяемом условиями постоянного мониторинга или специальных испытаний:

$$\frac{\partial t_{yx}}{\partial \xi} \Delta \xi = 0,5 \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{yx}} \right)_o^{-1} \left\{ q_2' + q_2'' - 2q_{2o} - \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{XB}} \right)_o (t_{XB}' + t_{XB}'' - 2t_{XB0}) - \right. \\ \left. - \left( \frac{\partial q_2}{\partial \alpha_{yx}} \right)_o (\alpha_{yx}' + \alpha_{yx}'' - 2\alpha_{yx0}) - \left( \frac{\partial q_2}{\partial t_{yx}} \right)_o \left[ \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial t_{T1}} \right)' (t_{T1}' - t_{T10}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial t_{T1}} \right)'' (t_{T1}'' - t_{T10}) + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial G_{KT}} \right)' (G_{KT}' - G_{KT0}) + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial G_{KT}} \right)'' (G_{KT}'' - G_{KT0}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial \alpha_{yx}} \right)' (\alpha_{yx}' - \alpha_{yx0}) + \left( \frac{\partial t_{yx}}{\partial \alpha_{yx}} \right)'' (\alpha_{yx}'' - \alpha_{yx0}) \right] \right\}. \quad (5.69)$$

Таким образом, расчётные формулы (5.60), (5.63) – (5.67), (5.69), (5.59) позволяют вычислить фактический КПД брутто котла  $\eta_i$  для последующего использования полученных результатов при решении системы уравнений (5.52). Реализация такого метода оптимизации нагрузок представляет научно-технический интерес в плане дальнейших исследований режимов работы котла. Характерные для этого метода громоздкие вычисления требуют организации постоянной системы мониторинга и применения вычислительной техники.

Наиболее эффективным (3-им) методом оптимизации нагрузок в котельной, работающей и в базовом, и в пиковом режимах, следует считать применение программных средств по тепловым расчётам котлов. Реализацию такого метода оптимизации тепловых нагрузок в котельной следует рассматривать как важное мероприятие по вопросам решения проблем энергосбережения, повышению технического уровня эксплуатации энергоисточников и системы теплоснабжения в целом.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Результаты исследования, изложенные в данной статье, подтверждают возможность и назревшую необходимость реализации проблем оптимизации котельных на базе соответствующих программных средств применительно к условиям производства. Приведенный в порядке примера программный файл ОПТВ1 рекомендуется для дальнейших разработок в этой области знаний.

1. Определены основные расчётные формулы, необходимые для организации мониторинга и разработки соответствующих программных средств по оптимизации нагрузок в водогрейной котельной,

2. Приведены и проанализированы результаты примерных расчётов, выполненных с помощью соответствующего программного средства. Обоснована эффективность его применения в условиях эксплуатации.

### **5.5. Исследование вариантов модернизации топки котла.**

Существенным недостатком котлов типа ПТВМ является подверженность заносам конвективных поверхностей нагрева золой и сажистыми частицами. Большую роль в этом процессе играет топка котла.

Наблюдения показывают, что на котлах типа ПТВМ факел от горелок часто достигает конвективного пучка (особенно при работе на мазуте), в то время как остальная часть объема топки, расположенная ниже оси горелок, практически не заполнена факелом. При этом, как правило, чем выше температура газов на выходе из топки, тем больше вероятность загрязнения последующих конвективных поверхностей нагрева.

Положение факела в топке во многом определяется уровнем горелочных устройств над её подом [51]. В отличие от их традиционной компоновки на стенах топки известны и хорошо зарекомендовали себя так называемые подовые горелки. Здесь немаловажную роль играют также размеры холодной воронки. В частности, в топке котла ПТВМ – 100 большие откосы её (порядка 45 градусов) приводят к неоправданному уменьшению топочного объёма.

Конструктивная схема топки котла типа ПТВМ показана на рис.5.8. Как видно из рисунка, не нарушая основного принципа её конфигурации, можно выполнить ряд конструктивных мероприятий, направленных на улучшение топочных процессов. Рассмотрим потенциальную возможность реализации трёх из них: изменений среднего уровня горелок над подом топки, угла откоса холодной воронки и высоты топки в целом. Указанные мероприятия расширяют возможности организации двухступенчатого сжигания топлива при двухъярусном расположении прямооточных горелочных устройств [79], т.е. позволяет в большей мере использовать объем топки в качестве смесеобразовательной камеры продуктов горения для снижения вредных выбросов.

Ниже приведен перечень расчётных формул, необходимых для выполнения этих мероприятий поочередно или в комплексе. Ожидаемый эффект от их реализации оценивается косвенно по изменениям температур газов на вы-

ходе из топки. Решение указанной задачи основывается на исходных данных, которые можно взять либо из материалов теплового расчёта котла, прилагаемых к его документации, либо установить на основании норм теплового расчёта [51], а именно (см. рис. 5.8):

– линейные размеры исходного варианта конфигурации топки и компоновки горелок в соответствии с данными, приведенными на рис.5.8;

$H_K, L_T, L_G, L_{II}, h_{ГН}, h_{ГВ}$ ; угол откоса холодной воронки  $\alpha$ ;

– количество горелочных устройств на стенке топки в нижнем –  $n_1$  и в верхнем –  $n_B$  ярусах;

– массовый расход сжигаемого топлива  $V_p$ , удельный объём продуктов сгорания  $V_G$  и их нормальная плотность  $\rho_G^0$ ;

– коэффициенты аппроксимации  $A_G$  и  $B_G$  по расчёту средней теплоёмкости дымовых газов ( $C_G = A_G + B_G t_G^{BX}$ ) при их температуре  $t_G^{BX}$  на входе в конвективный пучок, т. е. на выходе из топки;

– теоретическая температура горения  $t_a$ , степень черноты топки  $\hat{a}_\delta$ , постоянная Больцмана  $C_0$  и расчётные коэффициенты  $n$  и  $\beta$ , определяющие относительное положение ( $M$ ) максимума температуры пламени по высоте топки [51], т. е.  $M = n + \beta h_{Г0} H_T^{-1}$ ;

– массовый расход воды  $G_B$  через котёл и её теплоёмкость  $C_B$ ; поверхность конвективного пучка  $F_K$  и соответствующий ему коэффициент теплопередачи  $K$ ;

– коэффициент сохранения теплоты  $\phi$ , учитывающий потери в окружающую среду и среднее значение коэффициента тепловой эффективности экранов  $\psi_{ср}$ , учитывающего их загрязнение и влияние, так называемого, углового коэффициента.

Температура газов  $t_G^{BX}$  на выходе из топки определяется из уравнения, выраженного относительно последней в не явном виде:

$$\frac{t_a^{\hat{a}_\delta} + 273}{t_a + 273} = \frac{Bo^{0,6}}{Bo^{0,6} + \hat{I} \hat{a}_\delta^{0,6}}, \quad (5.70)$$

где

$$Bo = \frac{\phi \hat{A}_\delta (VC)_{\hat{n}\hat{\delta}}}{C_0 F_{c\delta} \psi_{\hat{n}\hat{\delta}} (t_a + 273)^3}. \quad (5.71)$$

Поверхность (в свету) ограждающих стен топки  $F_{сТ}$ , параметр  $\hat{I}$ , характеризующий относительное положение максимума температуры пламени и теплоёмкость продуктов сгорания  $(VC)_{ср}$  в расчёте на 1 кг сожжённого топлива определим, как функции геометрических размеров топочного пространства и размещения амбразур горелок (рис. 5.8):

$$F_{cT} = N_1 + N_2 \cos^{-1} \alpha + N_3 \operatorname{tg} \alpha, \quad (5.72)$$

$$M = n + \beta h_{r0} (H_K + N_4 \operatorname{tg} \alpha)^{-1}, \quad (5.73)$$

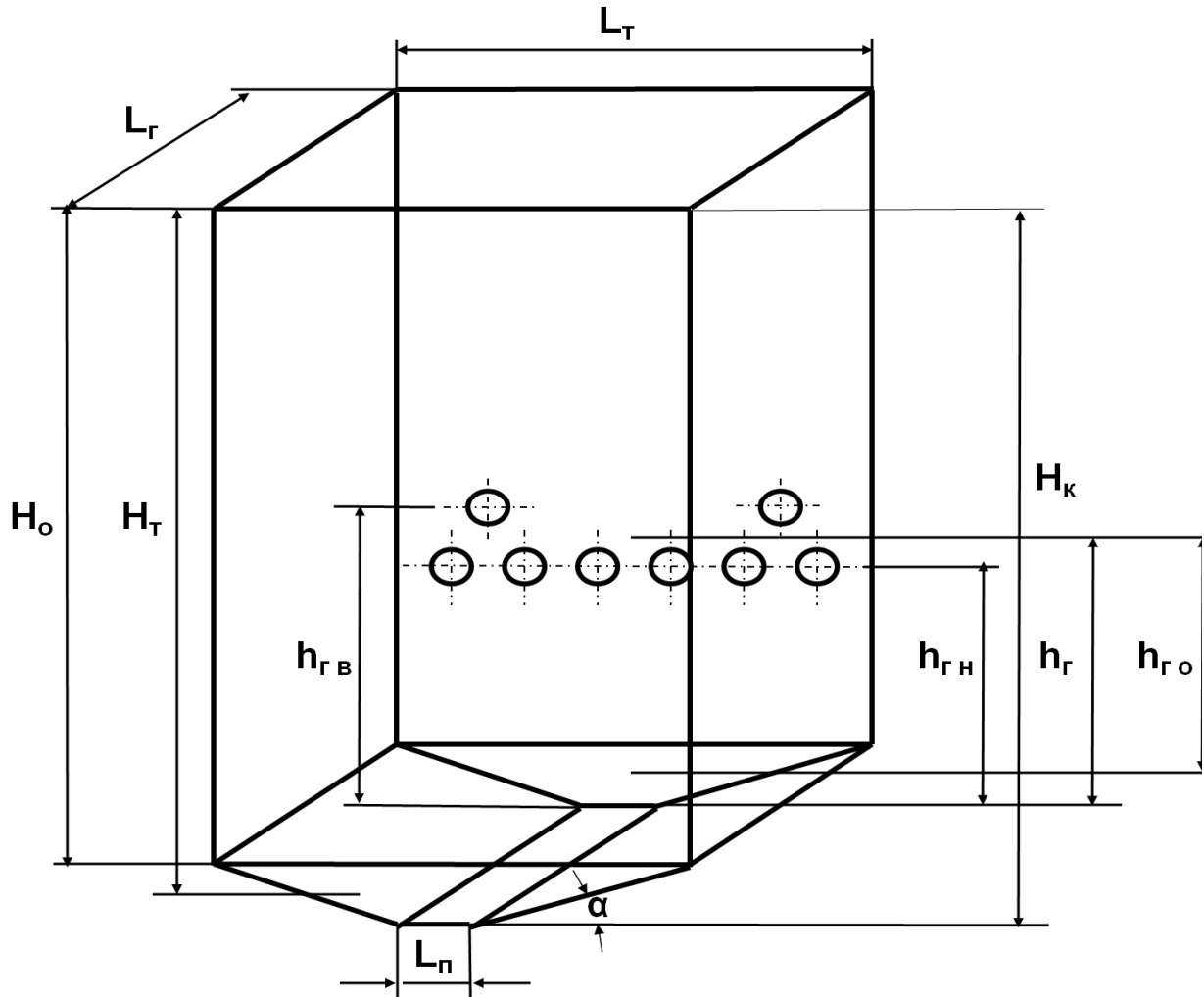


Рис. 5.8. Конструктивная схема топки котла типа ПТВМ.

$$(VC)_{cp} = \rho_r^0 V_r [A_r + B_r (t_a + t_r^{BX})] = N_5 + N_6 t_r^{BX}, \quad (5.74)$$

где

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= 2H_K(L_T + L_r) + L_r(L_T + L_n), \\ N_2 &= L_r(L_T - L_n), \\ N_3 &= -(L_T - L_n)[L_r + 0,5(L_T - L_n)], \\ N_4 &= -0,25(L_T - L_n), \\ N_5 &= \rho_r^0 V_r (A_r + B_r t_a), \\ N_6 &= \rho_r^0 V_r A_r. \end{aligned} \right\} \quad (5.75)$$

Согласно схеме на рис.5.8 средне-расчётный уровень горелок над подом топки  $h_r$  определим, как средний показатель размещения их между верхним и нижним ярусами так:

$$h_r = (h_{rH} n_H + h_{rB} n_B) (n_H + n_B)^{-1}. \quad (5.76)$$

Как видно, показатель  $h_r$  не зависит от угла раскрытия холодной во-

| МоТо2   |   | Исследование вариантов модернизация (Мод) топки котла |                   |                        |                        |                     |                      |                     |                                     |          |       |
|---|---|---|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------|----------|-------|
| Точки расчёта   |   | 0,00  | 0,22              | 0,44                   | 0,67                   | 0,89                | 1,11                 | 1,33                | 1,56                                | 1,78     | 2,00  |
| Кот 1   | от А, Б, В =                                      | 0,00  | Сохранить         | ГРАФИК                 | Удал. из нак.          | Удал. из бвф.       | Сохранить Мод. 1     |                     | Восстановить Мод. 1                 |          |       |
|   | до А, Б, В =                                      | 2,00  |                   |                        |                        |                     |                      |                     |                                     |          |       |
| Точки расчёта   |   | 1,00  | 1,22              | 1,44                   | 1,67                   | 1,89                | 2,11                 | 2,33                | 2,56                                | 2,78     | 3,00  |
| Кот 2   | от А, Б, В =                                      | 1,0   | Сохранить         | ГРАФИК                 | Удал. из нак.          | Удал. из бвф.       | Сохранить Мод. 2     |                     | Восстановить Мод. 2                 |          |       |
|   | до А, Б, В =                                      | 3,0   |                   |                        |                        |                     |                      |                     |                                     |          |       |
| Автоматизированный расчёт и построение графиков   |   |   |                   |                        |                        |                     |                      |                     |                                     |          |       |
| Указать тип котла   | Кот 1   | Мод   | А →               | $\delta h_{гo}^o$      | Указать тип котла      | Кот 2               | Мод                  | А →                 | $\delta h_{гo}^o$                   |          |       |
|   |   |   | Б →               | $\alpha$               |                        |                     |                      | Б →                 | $\alpha$                            |          |       |
| ПТВМ-50   |   |   | В →               | $\Delta H_k$           | ПТВМ-100               |                     |                      | В →                 | $\Delta H_k$                        |          |       |
| Расчёт основных показателей топки по мере изменения среднего уровня грелок $h_{гo}$ , угла раскрытия холодной воронки $\alpha$ и высоты топки котла $H_k$ . |   |   |                   |                        |                        |                     |                      |                     |                                     |          |       |
| X ← Исходные данные   |   |   |                   | X ← Результаты расчёта |                        |                     |                      |                     |                                     |          |       |
| Наимен.   | Исходные (исх) данные и результаты (мод) расчётов |   |                   |                        |                        |                     |                      |                     |                                     |          |       |
| Обозн.  | $\delta h_{гo}$                                   | $\alpha$  | $\Delta H_k$      | Решение задачи         | $t_{г}^{BX}$           | $\Delta t_{г}^{BX}$ | $\Delta t_{г}^{ВЫX}$ | $\Delta t_{В}^{BX}$ | $\Delta t_{В}^{ВЫX}$                |          |       |
| Разм.   | -   | град  | м                 |                        | $^oC$                  | $^oC$               | $^oC$                | $^oC$               | $^oC$                               |          |       |
| Кот 1   | Исх.  | -0,20   | 15,0              | 0,50                   | Реш. ВЫП               | 1204                | -35,98               | 0,050               | 0,979                               | -0,001   |       |
|   | Мод   |   | 5,0               |                        | Реш. ВЫП               | 1168                |                      |                     |                                     |          |       |
| Кот 2   | Исх.  | -0,20   | 45,0              | 0,00                   | Реш. ВЫП               | 1265                | -52,37               | -0,067              | 1,469                               | 0,002    |       |
|   | Мод   |   | 5,0               |                        | Реш. ВЫП               | 1213                |                      |                     |                                     |          |       |
| Обозн.  | $\Delta h_{гo}$                                   | $\Delta \alpha$                                       | $H_k$             | $L_{г}$                | $L_{т}$                | $L_{п}$             | $n_H$                | $n_B$               | $h_{гH}$                            | $h_{гB}$ |       |
| Разм.   | м   | град  | м                 | м                      | м                      | м                   | -                    | -                   | м                                   | м        |       |
| Кот 1   | Исх.  | -0,45   | -10,00            | 7,57                   | 4,160                  | 4,160               | 0,450                | 4,00                | 2,00                                | 2,217    | 3,077 |
|   | Мод   |   |                   | 8,07                   |                        |                     |                      |                     |                                     | 1,599    | 2,459 |
| Кот 2   | Исх.  | -0,44   | -0,70             | 8,05                   | 6,230                  | 6,230               | 0,640                | 6,00                | 2,00                                | 3,395    | 4,195 |
|   | Мод   |   |                   | 8,05                   |                        |                     |                      |                     |                                     | 1,680    | 2,480 |
| Обозн.  | $V_p$   | $V_{г}$   | $\rho_{гo}^o$     | $A_{г}$                | $B_{г}$                | $\varphi$           | $\Psi_{cp}$          | $a_T$               | $C_o$                               | $t_a$    |       |
| Разм.   | кг/с  | м <sup>3</sup> /кг                                    | кг/м <sup>3</sup> | Дж/(кгК)               | Дж/(кгК <sup>2</sup> ) | -                   | -                    | -                   | Вт/(м <sup>2</sup> К <sup>4</sup> ) | $^oC$    |       |
| Кот 1   | Исх.  | 1,74  | 12,60             | 1,32                   | 1070                   | 0,112               | 0,996                | 0,600               | 0,682                               | 6E-08    | 1840  |
|   | Мод   |   |                   |                        |                        |                     |                      |                     |                                     |          |       |
| Кот 2   | Исх.  | 3,47  | 12,60             | 1,32                   | 1070                   | 0,112               | 0,996                | 0,545               | 0,778                               | 6E-08    | 1844  |
|   | Мод   |   |                   |                        |                        |                     |                      |                     |                                     |          |       |
| Обозн.  | $n$   | $\beta$   | $G_B$             | $C_B$                  | $K$                    | $F_k$               | $H_o$                | $H_T$               | $h_{г}$                             | $h_{гo}$ |       |
| Разм.   | -   | -   | кг/с              | Дж/(кгК)               | Вт/(м <sup>2</sup> К)  | м <sup>2</sup>      | м                    | м                   | м                                   | м        |       |
| Кот 1   | Исх.  | 0,54  | -0,20             | 306                    | 4180                   | 52,40               | 1170                 | 7,075               | 7,324                               | 2,504    | 2,255 |
|   | Мод   |   |                   |                        |                        |                     |                      | 7,910               | 7,991                               | 1,885    | 1,804 |
| Кот 2   | Исх.  | 0,54  | -0,20             | 595                    | 4180                   | 52,40               | 2960                 | 5,250               | 6,648                               | 3,595    | 2,198 |
|   | Мод   |   |                   |                        |                        |                     |                      | 7,800               | 7,923                               | 1,880    | 1,758 |
| Обозн.  | $F_{CT}$  | $M$   | $Bo$              | $tg\alpha$             | $cos\alpha$            | $(VC)_{cp}$         | $G_{г}$              | $C_{г}$             | $m$                                 | $L$      |       |
| Разм.   | м <sup>2</sup>                                    | -   | -                 | -                      | -                      | Дж/(кгК)            | кг/с                 | Дж/(кгК)            | -                                   | -        |       |
| Кот 1   | Исх.  | 155,2   | 0,478             | 0,81                   | 0,27                   | 0,97                | 23467                | 28,94               | 1205                                | 0,027    | 0,005 |
|   | Мод   | 167,0   | 0,495             | 0,75                   | 0,09                   | 1,00                | 23400                |                     | 1201                                | 0,027    |       |
| Кот 2   | Исх.  | 242,1   | 0,474             | 1,14                   | 1,00                   | 0,71                | 23588                | 57,71               | 1212                                | 0,028    | 0,012 |
|   | Мод   | 273,8   | 0,496             | 1,01                   | 0,09                   | 1,00                | 23490                |                     | 1206                                | 0,028    |       |

Рис. 5.9. Фрагмент из программного файла МоТо2.

ронки  $\alpha$ . Поэтому в дальнейшем (рис. 5.8) вводим показатель  $h_{\Gamma_0}$ , учитывающий угол  $\alpha$ , что также существенно при расчёте показателя  $M$  [51], вычисляемого по формуле (5.73). Итак, средне-расчётный уровень горелочных устройств при их двухъярусной компоновке и при наличии холодной воронки определим так:

$$h_{\Gamma_0} = h_{\Gamma} - H_{\Gamma} + H_0, \quad (5.77)$$

где по данным на рис. 5.8 высота топки до начала холодной воронки

$$H_0 = H_{\kappa} - 0,5(L_{\Gamma} - L_{\Pi}) \operatorname{tg} \alpha, \quad (5.78)$$

а до её средней линии

$$H_{\Gamma} = H_0 + 0,25(L_{\Gamma} - L_{\Pi}) \operatorname{tg} \alpha. \quad (5.79)$$

данных до (исх) и после (мод) её модернизации. Соответствующее изменение этой температуры в сравнении с исходным вариантом исполнения конструкции топки определяем как разность:

$$\Delta t_{\Gamma}^{\text{BX}} = (t_{\Gamma}^{\text{BX}})_{\text{мод}} - (t_{\Gamma}^{\text{BX}})_{\text{исх}}. \quad (5.80)$$

Практический интерес представляют также оценочные значения отклонений температур газов  $\Delta t_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}$  за конвективным пучком и воды на входе  $\Delta t_{\text{В}}^{\text{BX}}$  и выходе  $\Delta t_{\text{В}}^{\text{ВЫХ}}$  из него. Эти показатели можно вычислить на основании соответствующего анализа процесса тепловосприятия конвективного пучка, полагая, что средний коэффициент теплопередачи через его поверхность не изменится.

Тепловосприятие конвективного пучка с поверхностью  $F_{\kappa}$  равно:

$$Q_{\kappa} = KF_{\kappa} \delta \tau, \quad (5.81)$$

где температурный напор  $\delta \tau$  с достаточной точностью представим как разность между средними температурами газов и воды:

$$\delta \tau = t_{\Gamma}^{\text{CP}} - t_{\text{В}}^{\text{CP}}. \quad (5.82)$$

Соответственно:

$$\left. \begin{aligned} t_{\Gamma}^{\text{CP}} &= 0,5(t_{\Gamma}^{\text{BX}} + t_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}), \\ t_{\text{В}}^{\text{CP}} &= 0,5(t_{\text{В}}^{\text{BX}} + t_{\text{В}}^{\text{ВЫХ}}). \end{aligned} \right\} \quad (5.83)$$

Согласно (5.81) изменение тепловосприятия конвективного пучка после модернизации представим в виде полного дифференциала:

$$dQ_{\kappa} = KF_{\kappa} d(\delta \tau), \quad (5.84)$$

где на основании (5.82), (5.83)

$$d(\delta \tau) = 0,5(dt_{\Gamma}^{\text{BX}} + dt_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}} - dt_{\text{В}}^{\text{BX}} - dt_{\text{В}}^{\text{ВЫХ}}). \quad (5.85)$$

Увеличение тепловосприятия в топке приводит к уменьшению температуры газов на выходе из нее, т.е. на входе в конвективный пучок  $t_{\Gamma}^{\text{BX}}$ . В соответствии с этим температура воды  $t_{\text{В}}^{\text{BX}}$  на входе в конвективный пучок возрастает и наоборот. Аналогичная связь имеется также в отношении температур газов  $t_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}$  и воды  $t_{\text{В}}^{\text{ВЫХ}}$  на выходе из конвективного пучка:

$$\left. \begin{aligned} G_{\Gamma} C_{\Gamma} dt_{\Gamma}^{BX} &\approx -G_B C_B dt_B^{BX}, \\ G_{\Gamma} C_{\Gamma} dt_{\Gamma}^{BЫX} &\approx -G_B C_B dt_B^{BЫX}. \end{aligned} \right\} \quad (5.86)$$

На основании (5.86) определяем:

$$\left. \begin{aligned} dt_B^{BX} &\approx -w dt_{\Gamma}^{BX}, \\ dt_B^{BЫX} &\approx -w dt_{\Gamma}^{BЫX}, \end{aligned} \right\} \quad (5.87)$$

где  $w$  – отношение водяных эквивалентов при массовом расходе газа  $G_{\Gamma} = V_p V_{\Gamma} \rho_{\Gamma}^0$ :

$$w = \frac{G_{\Gamma} C_{\Gamma}}{G_B C_B}. \quad (5.88)$$

Разность между левыми и правыми частями уравнений (5.86) представляет собой уравнение теплового баланса конвективного пучка:

$$dQ_K \approx G_{\Gamma} C_{\Gamma} (dt_{\Gamma}^{BX} - dt_{\Gamma}^{BЫX}) \approx G_B C_B (dt_B^{BЫX} - dt_B^{BX}). \quad (5.89)$$

Тогда на основании (5.84) – (5.89) определяем:

$$\Delta t_{\Gamma}^{BЫX} = (t_{\Gamma}^{BЫX})_{\text{мод}} - (t_{\Gamma}^{BЫX})_{\text{исх}} \approx dt_{\Gamma}^{BЫX} = dt_{\Gamma}^{BX} \frac{G_{\Gamma} C_{\Gamma} - 0,5 \cdot KF_K (1 + w)}{G_{\Gamma} C_{\Gamma} + 0,5 \cdot KF_K (1 + w)}. \quad (5.90)$$

Соответственно на основании (5.87) вычисляем:

$$\left. \begin{aligned} \Delta t_B^{BX} &= (t_B^{BX})_{\text{мод}} - (t_B^{BX})_{\text{исх}} \approx dt_B^{BX}, \\ \Delta t_B^{BЫX} &= (t_B^{BЫX})_{\text{мод}} - (t_B^{BЫX})_{\text{исх}} \approx dt_B^{BЫX}. \end{aligned} \right\} \quad (5.91)$$

Материалы данных исследований положены в основу разработки программного файла МоТо2, позволяющего выполнять соответствующие расчёты при любых изменениях исходных данных и с одновременным построением графиков. На выкопировке из рабочего листа этого файла (рис. 5.9) представлены результаты примерных расчётов по модернизации топок котлов ПТВМ-50 и ПТВМ-100. В частности, на котле ПТВМ-50 в сравнении с исходным вариантом его исполнения снижен уровень горелочных устройств на относительную величину  $\delta h_{\Gamma O} = \Delta h_{\Gamma O} (h_{\Gamma O}^{\text{исх}})^{-1} = (h_{\Gamma O}^{\text{мод}} - h_{\Gamma O}^{\text{исх}}) (h_{\Gamma O}^{\text{исх}})^{-1} = -0,45/2,255 = (1,804 - 2,255)/2,255 = -0,2$ . Одновременно увеличена высота топки на  $\Delta H_K = 0,5$  м и уменьшен откос холодной воронки с  $15^{\circ}$  до  $5^{\circ}$ . В результате температура газов на выходе из топки  $t_{\Gamma}^{BX}$  снизилась на величину  $\Delta t_{\Gamma}^{BX} = -35,98$  °С. Аналогичная модернизация выполнена в топке котла ПТВМ-100: уровень горелочных устройств снижен на относительную величину  $\delta h_{\Gamma O} = -0,2$  и откос холодной воронки уменьшен от  $45^{\circ}$  до  $5^{\circ}$ . В результате температура газов на выходе из топки  $t_{\Gamma}^{BX}$  снизилась на величину  $\Delta t_{\Gamma}^{BX} = -52,37$  °С.

Результаты выполненных исследований показывают, что изменение температуры газов  $t_{\Gamma}^{BX}$  на выходе из топки, т.е. на входе в конвективный пучок, приводит, как правило, к незначительному её изменению на выходе из



конвективного пучка. Также несущественно изменяется температура воды в конвективном пучке.

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

Для повышения экономичности и коррозионной стойкости поверхностей нагрева ряда котлов традиционных, а также при разработке котлов новых конструкций, их в ряде случаев следует модернизировать. В частности:

1. Улучшить топочные процессы и, как следствие этого, уменьшить занос конвективного пучка путем:

- снижения уровня горелочных устройств в топке котла до минимально-допустимого;

- увеличения объема топки за счет её высоты или ликвидации больших откосов холодной воронки.

2. Материалы исследования и, в частности, упомянутый файл «MoTo2» могут быть использованы в качестве консультационно-справочного средства при выполнении соответствующих конструкторских и наладочных работ.