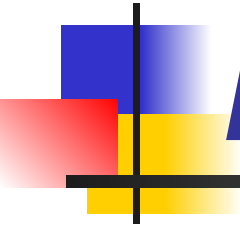
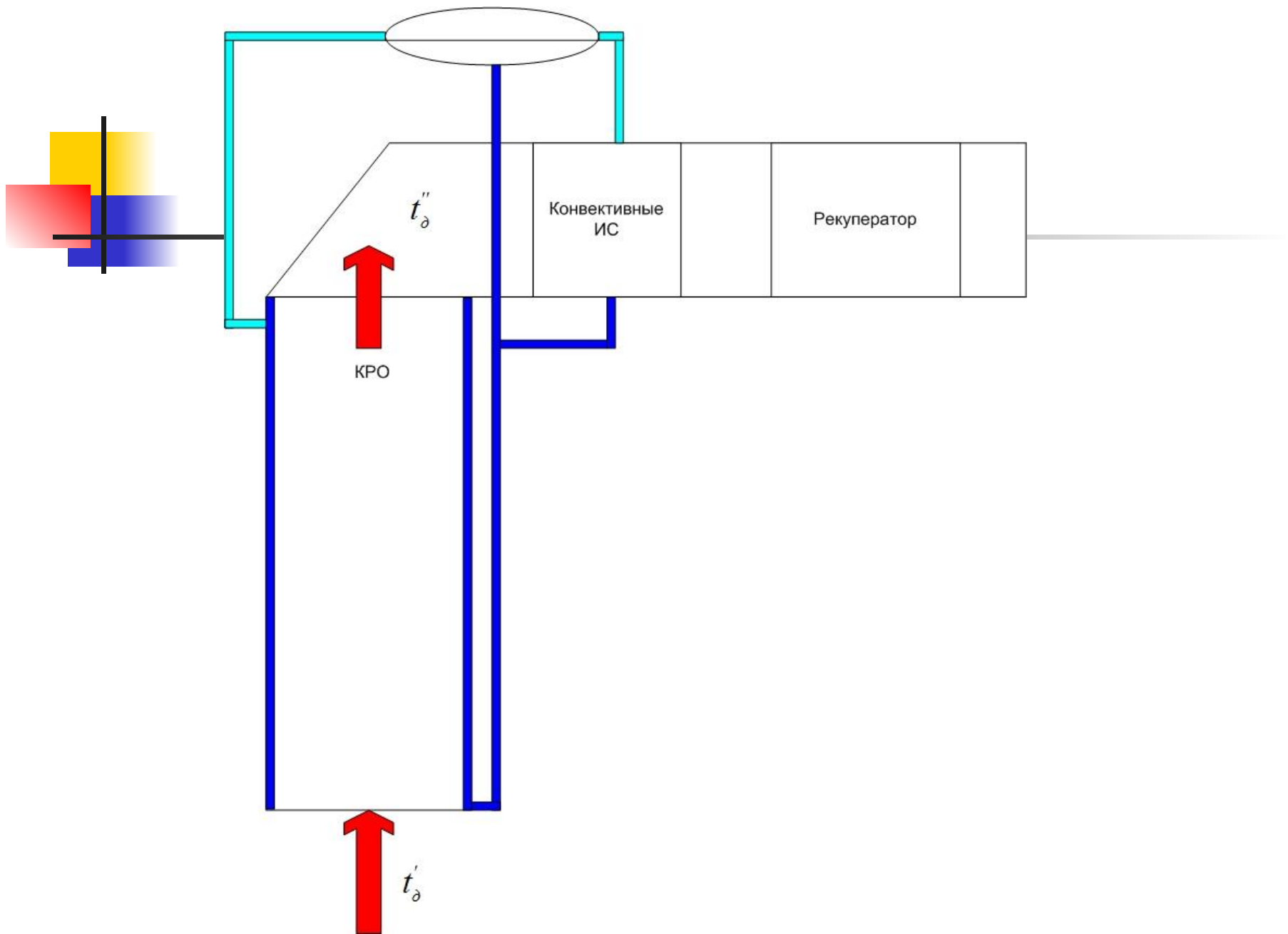
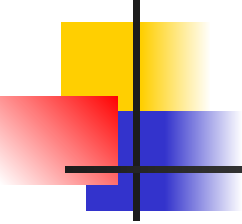


***Основы теплового расчета
энерготехнологического
агрегата (камера
радиационного охлаждения)***





- 
-
- Камера радиационного охлаждения (КРО) представляет из себя газоход, полностью экранированный по всей образующей боковой поверхности. Цель расчета – определить геометрические размеры агрегата, рассчитать паропроизводительность при известных параметрах насыщенного пара.



Исходные данные для расчета:

- начальная температура дымовых газов $t_{\text{д}}^{\circ}\text{C};$
- расход $V_{\text{д0}}$ куб. метров в час (при н.у.);
- подсос воздуха составит Π , доли ед.

Состав отходящих газов: $a\%$ диоксида углерода, $b\%$ водяных паров, $c\%$ кислорода, остальное азот. Давление получаемого пара $P_{\text{нп}}$, МПа.



Расчет теплопередачи

Расчет теплопередачи осуществляют последовательно по ходу движения дымовых газов.

Оценивая площадь тепловоспринимающей поверхности и учитывая, что температура входящих в элемент КРО дымовых газов известна, произвольно принимают их температуру после определенного участка $t_{\text{дк}}$.

Тогда средняя температура газов при движении через рассчитываемый участок составит:

$$t_{\text{д}} = 0,5(t_{\text{дн}} + t_{\text{дк}}),$$



Расчет теплопередачи

- Упрощая расчет, допускаем, что количество дымовых газов с учетом подсоса воздуха в среднем по КРО будет равно:

$$V_{no} = V_{до} (1 + 0,5\Pi)$$



Расчет теплопередачи

- Действительный (с учетом средней температуры) расход дымовых газов V_d для рассчитываемого участка определим по следующей зависимости:

$$V_d = V_{no} (1 + t_d / 273)$$



Расчет теплопередачи

- Средняя скорость дымовых газов в рассматриваемом сечении КРО составит

$$w = V_{д} / f_{д}$$

- Учитываем, что скорость движения газов при н.у. не должна превышать 2...3 м/с.



Расчет теплопередачи

- Количество тепла, переданное газами паро-водяной смеси, составит:

$$Q = k * F * \delta t$$



Расчет теплопередачи

- Среднелогарифмическую разность температур между дымовыми газами и нагреваемой средой определяют по следующей зависимости:

$$\delta t = (\Delta t_{нач} - \Delta t_{кон}) / \ln(\Delta t_{нач} / \Delta t_{кон}),$$



Расчет теплопередачи

- При расчете среднелогарифмической разности температур в КРО следует обратить внимание на то, что температура нагреваемой среды (пароводяной смеси) не изменяется и зависит от давления в барабане-сепараторе.



Расчет теплопередачи

- Коэффициент теплопередачи рассчитывают по следующей зависимости:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\partial}} + \gamma + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}}, \quad \text{Вт} / (\text{м}^2 * \text{К})$$

$$\alpha_{\partial} = \alpha_{\partial\text{л}} + \alpha_{\partial\text{к}}$$



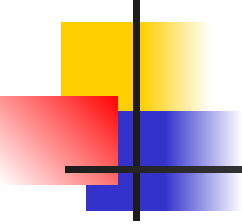
Расчет теплопередачи

- Рекомендуют не учитывать влияние термического сопротивления отложений при работе на незагрязненных газах ($\gamma=0$). Если КРО установлена за плавильной печью, то $\gamma=0,003 - 0,005$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт.
- Коэффициент $\alpha_{\text{дк}}$ рекомендуется принять равным 5...10% от $\alpha_{\text{дл}}$

- 
- Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{дл} = \frac{C_{np} \left[\frac{\varepsilon_{д}}{a_{д}} \left(\frac{T_{д}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right]}{(T_{д} - T_{ст})}, \frac{\text{Вт}}{(\text{мК})}$$

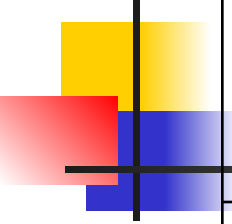
$$C_{np} = \frac{C_0}{\frac{1}{a_{д}} + \frac{1}{\varepsilon_{ст}} - 1}$$

- 
- Степень черноты газов и коэффициент поглощения газового объема

$$\varepsilon_{\text{д}}(a_{\text{д}}) = 1 - \exp[-K_{\lambda} (p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}_2}) S_{\text{эфф}}]$$

$$K_{\lambda} = \frac{(0,8 + 1,6 p_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot (1 - 0,00038 \cdot T)}{[(p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}_2}) \cdot S_{\text{эфф}}]^{0,5}}$$

Теплосодержание газов і от температуры



Температура, С	Теплосодержание газов, кДж/куб. м			
	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
100	172	150	131	130
200	362	303	267	261
300	564	461	407	392
400	777	624	552	527
500	1002	792	700	665
600	1237	964	852	805
700	1475	1144	1005	940
800	1719	1328	1162	1095
900	1972	1518	1320	1244
1000	2227	1713	1480	1394



Определение паропроизводительности КРО

- В соответствии с таблицей теплосодержания газов от температуры определяем уравнение теплосодержания для заданной газовой смеси (используем свойство аддитивности).

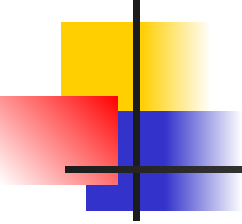


Определение паропроизводительности КРО

- После определения количества тепла, переданного продуктами сгорания в первом по ходу движения газов элементе КРО, уточняют значение принятой температуры. По уравнению теплового баланса находят энтальпию продуктов сгорания $i_{\text{д}}''$ за элементом поверхности нагрева:

$$i_{\text{д}}'' = i_{\text{д}}' - \frac{Q\xi}{V_{\text{по}}}, \text{ ДЖ} / \text{м}^3$$

- где $\xi=0,9 - 0,95$ - коэффициент сохранения тепла;
- $i_{\text{д}}'$ - энтальпия продуктов сгорания до рассчитываемого элемента поверхности нагрева, кДж/м³;

- 
-
- Воспользовавшись построенной $i - t$ диаграммой, по вычисленному значению энтальпии i''_d определяют температуру за элементом поверхности нагрева. Если полученная температура отличается от принятой более чем на величину заданной погрешности, то задаются новым значением температуры и заново рассчитывают теплопередачу в элементе КРО.



Определение паропроизводительности КРО

- В последнюю очередь определяют паропроизводительность КРО:

$$D = Q / (i''), \text{ кг} / \text{с},$$

где Q – тепловой поток, переданный от газов к пароводяной смеси в КРО;

i'' – удельная энтальпия насыщенного водяного пара при заданном давлении, Дж/кг.



Расчет конвективных секций

- Планируется после камеры радиационного охлаждения установить одну либо две конвективных испарительных секции. Их характеристики приведены ниже.

Краткая конструктивная характеристика унифицированных конвективных котлов-утилизаторов типа КУ

Показатель	Тип котла	Характеристики секций (пакетов) котла					
		ПИП	ПП	Основные испарительные секции			ВЭ
				ИС1	ИС2	ИС3	
Расчетная площадь поверхности нагрева, кв.м	КУ 40	30	43,5	109,5	122	111	185
	КУ 60	46	70	173	192	175	247
	КУ 80	60	87	219	244	221	370
	КУ 100	85	110	285	315	295	460
	КУ 125	110	144	370	410	380	615
	КУ 150	133	166	415	475	436	725
Площадь сечения для прохода продуктов сгорания, кв.м.	КУ 40	4,32	3,17	3,17	3,17	2,885	3,18
	КУ 60	7,00	5,06	5,06	5,06	4,63	4,55
	КУ 80	8,63	6,34	6,34	6,34	6,34	6,36
	КУ 100	10,8	8,04	8,04	8,04	8,04	7,67
	КУ 125	13,2	10,3	10,3	10,3	10,3	9,8
	КУ 150	16,6	12,5	12,5	12,5	12,5	9,65
Кол-во рядов труб по ходу движения продуктов сгорания, шт	Все типы котлов	12	8	22			20
Шаг труб по ширине пучка (поперечный шаг), мм	Все типы котлов	172	86			90	
Шаг труб по глубине пучка (продольный шаг), мм	Все типы котлов	70					
Наружный диаметр труб, мм	Все типы котлов	32					

- Расчет теплопередачи осуществляют последовательно в отдельных секциях по ходу движения дымовых газов.

■ Оценивая площадь тепловоспринимающей поверхности и учитывая, что температура входящих в секцию дымовых газов известна, произвольно принимают их температуру после секции $t_{дк}$.

- Тогда средняя температура газов при движении через рассчитываемую секцию составит:

$$t_{\partial} = 0,5 \cdot (t_{\partialн} + t_{\partialк}),$$



Расчет теплопередачи

- Средняя скорость дымовых газов в рассматриваемой секции составит

$$w = V_{\text{д}} / f_{\text{д}}$$

где площадь для прохода дымовых газов берут из таблицы конструктивной характеристики выбранной секции.

- Количество тепла, переданное газами паро-водяной смеси (в испарительных секциях), составит:
-

$$Q = k \cdot F \cdot \delta t$$



Расчет теплопередачи

- Среднелогарифмическую разность температур между дымовыми газами и нагреваемой средой определяют по следующей зависимости:

$$\delta t = (\Delta t_{нач} - \Delta t_{кон}) / \ln(\Delta t_{нач} / \Delta t_{кон}),$$



Расчет теплопередачи

- При расчете среднелогарифмической разности температур в секции следует обратить внимание на то, что температура нагреваемой среды (пароводяной смеси) не изменяется и зависит от давления в барабане-сепараторе.



Расчет теплопередачи

- Коэффициент теплопередачи рассчитывают по следующей зависимости:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\partial}} + \gamma + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$



Расчет теплопередачи

- Рекомендуют не учитывать влияние термического сопротивления отложений при работе на незагрязненных газах ($\gamma=0$). Если секция установлена за плавильной печью, то $\gamma=0,003\dots 0,005$ ($\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}$.

- Для определения конвективной составляющей $\alpha_{\text{дк}}$ сначала вычисляют безразмерный параметр p :

$$p = (S_1 - d) / (S - d),$$

где S_1 – поперечный шаг труб, м;

$S = (0,25 \cdot S_1 + S_2)^{0,5}$ – диагональный шаг труб, м;

d – наружный диаметр труб, м;

S_2 – продольный шаг труб, м.

- При шахматном расположении труб для конвективного коэффициента теплоотдачи имеем следующую зависимость при $Re \geq 0,7$:

$$\alpha_{\partial K} = 0,334 \cdot C_z \cdot \frac{\lambda \cdot Pr^{0,35}}{d^{0,4}} * Re^{0,25} * (w/\nu)^{0,6}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

при $Re < 0,7$

$$\alpha_{\partial K} = 0,305 \cdot C_z \cdot \frac{\lambda \cdot Pr^{0,35}}{d^{0,4}} * (w/\nu)^{0,6}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

- где λ - коэффициент теплопроводности дымовых газов, Вт/(м·К);
- ν - коэффициент кинематической вязкости дымовых газов, м²/с;
- w - действительная скорость дымовых газов, м/с;
- Pr - число Прандтля для дымовых газов;
- C_z - поправка на число рядов труб Z_2 в направлении движения дымовых газов. Рекомендуется принимать $C_z = 0,95$ при Z_2 от 5 до 9, $C_z = 0,98$ при Z_2 от 10 до 19, $C_z = 1$ при Z_2 свыше 20.

Зависимость теплофизических свойств дымовых газов среднего состава от температуры

Температура, С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К)
0	0,0228
100	0,0313
200	0,0401
300	0,0484
400	0,057
500	0,0656
600	0,0742
700	0,0827
800	0,0915
900	0,1
1000	0,109

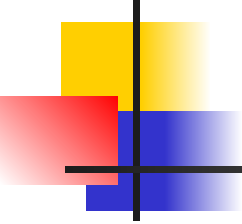
Зависимость теплофизических свойств дымовых газов среднего состава от температуры

Температура, С	Коэффициент кинематической вязкости *10 ⁶ , м ² /с	Число Прандтля
0	12,2	0,749
100	21,5	0,69
200	32,8	0,669
300	45,8	0,653
400	60,4	0,64
500	76,3	0,629
600	93,6	0,619
700	112,1	0,609
800	131,8	0,6
900	152,5	0,59
1000	174,3	0,581

- 
- Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{\text{дл}} = \frac{C_{\text{пр}} \left[\frac{\varepsilon_{\text{д}}}{a_{\text{д}}} (T_{\text{д}} / 100)^4 - (T_{\text{см}} / 100)^4 \right]}{(T_{\text{д}} - T_{\text{см}})}, \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

$$\text{где } C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{\frac{1}{a_{\text{д}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{см}}} - 1}$$

- 
- Степень черноты газов и коэффициент поглощения газового объема

$$\varepsilon_{\delta}(a_{\delta}) = 1 - \exp\left[-K \cdot (p_{H_2O} + p_{CO_2}) \cdot S_{\text{эфф}}\right]$$

$$K = \frac{(0,8 + 1,6 \cdot p_{H_2O}) * (1 - 0,00038 \cdot T)}{\left[(p_{H_2O} + p_{CO_2}) * S_{\text{эфф}}\right]^{0,5}}$$

■ Для определения эффективной толщины излучающего слоя вначале необходимо рассчитать параметр $p_s = (S_1 + S_2)/d$. Если $p_s \leq 7$, то

$$S_{\text{эфф}} = (1,87 \cdot p_s - 4,1) \cdot d$$

- В случае, когда $7 < p_s < 13$, имеем следующую зависимость:

$$S_{\text{эфф}} = (2,82 \cdot p_s - 10,6) \cdot d$$

Определение паропроизводительности

- После определения количества тепла, переданного продуктами сгорания в первой по ходу движения газов секции, уточняют значение принятой температуры. По уравнению теплового баланса находят энтальпию продуктов сгорания $i_{\text{д}}''$ за элементом поверхности нагрева:

$$i_{\text{д}}'' = i_{\text{д}}' - \frac{Q\xi}{V_{\text{по}}}, \text{ кДж} / \text{м}^3$$

- где $\xi=0,9 - 0,95$ - коэффициент сохранения тепла;
- $i_{\text{д}}'$ - энтальпия продуктов сгорания до рассчитываемого элемента поверхности нагрева, кДж/м³;

Определение паропроизводительности секции

- Воспользовавшись построенной $i - t$ диаграммой, по вычисленному значению энтальпии i''_d определяют температуру за элементом поверхности нагрева. Если полученная температура отличается от принятой более чем на величину заданной погрешности, то задаются новым значением температуры и заново рассчитывают теплопередачу в секции.

Определение паропроизводительности секции

- В последнюю очередь определяют паропроизводительность секции:

$$D = Q / (i''), \text{ кг / с.}$$

Расчет рекуператора

Расчет рекуператора будем проводить, располагая данными по температуре дымовых газов перед рекуператором t'_d и температуре воздуха до $t'_в$ и после $t''_в$ рекуператора.

Пользуемся уравнением теплопередачи (через известную площадь теплообмена F)

$$F = \frac{Q_в}{K \Delta t}$$

и уравнением теплового баланса

$$Q_в = V_в (c''_в t''_в - c'_в t'_в)$$

Расчет рекуператора

Оценим неизвестный нам пока расход воздуха через известный расход продуктов сгорания:

$$V_{\partial} = BV_{\alpha}$$

Нам известно, что печь отапливается природным газом. Для этого топлива примерное значение V_{α} составит 11,5...12 (с учетом подсоса воздуха можно принять максимальное значение). Тогда определим расход топлива и по формуле

$$V_{\partial} = BL_{\alpha}$$

оценим расход воздуха ($L_{\alpha} \approx 10,5...11$)

Расчет рекуператора

Определим количество теплоты, уносимое продуктами сгорания из рекуператора:

$$Q_d'' = 0,95Q_d' - Q_e'$$

По величине Q_d'' и расходу продуктов сгорания определим вначале энтальпию, а затем и температуру отходящих из рекуператора газов.

$$Q_d'' = V_d'' c_{p,d}'' t_d''$$

Для этого надо установить зависимость между теплосодержанием и температурой для дыма среднего состава.

Температура, С	Средняя теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(куб.м·К)
0	1,359
100	1,370
200	1,381
300	1,397
400	1,415
500	1,431
600	1,448
700	1,460
800	1,472
900	1,485

Расчет рекуператора

Теперь мы располагаем всеми данными для расчета среднелогарифмической разности температур. Помним, что в петлевом металлическом рекуператоре реализована противоточная схема теплообмена. Поправку на перекрестный ток в данном расчете делать не будем.

Из таблицы выбираем для расчета одну из секций. В общем случае секции можно соединять последовательно и параллельно.



Расчет рекуператора

Номер секции	F, м ²	Площадь сечения для прохода воздуха, м ²	Площадь сечения для прохода дыма, м ²	Наружный диаметр и толщина стенки трубы, мм*	Число рядов труб по направлени ю дыма, шт	Продольны й/поперечн ый шаг труб, мм
1	100	0,2	3,7	76x4,5	6	140/150
2	150	0,28	4,6	76x4,5	7	140/150
3	200	0,38	6,3	76x4,5	8	150/150
4	250	0,49	6,6	76x4,5	9	150/165
5	300	0,62	7,6	76x4,5	10	160/175

Расчет рекуператора

Для предварительного выбора секции необходимо определить площадь для прохода воздуха ω_v и продуктов сгорания ω_d из расчета средних скоростей движения дыма 2...3 м/с и воздуха 8...12 м/с (при н.у.):

$$\omega_v = V_v / w_{v0}$$

$$\omega_d = V_d / w_{d0}$$

Далее определяем коэффициент теплопередачи.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \gamma + \frac{1}{\alpha_v}}, \quad \text{Вт} / (\text{м}^2 * \text{К})$$

Расчет рекуператора

Методика определения конвективного и лучистого коэффициентов теплоотдачи для дымовых газов такая же, как и для конвективной секции (см. слайды 27...38). Для определения конвективной составляющей теплоотдачи от стенки трубы к воздуху вначале рассчитаем число Нуссельта:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

Не следует забывать, что при определении числа Рейнольдса скорость воздуха должна быть определена при рабочих условиях. Теплофизические характеристики воздуха приведены в таблице.

Теплофизические свойства воздуха при атмосферном давлении

Температура, °С	Средняя теплоемкость, Дж/(м ³ ·К)	Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	Коэффициент кинематической вязкости, $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Число Прандтля
0	1318	25	13	0,722
100	1324	32	23	0,722
200	1332	39	35	0,722
300	1342	46	48	0,722
400	1354	52	63	0,722
500	1366	58	79	0,722

Расчет рекуператора

Рассчитав число Нуссельта, определяем конвективный коэффициент для воздуха:

$$\alpha_v = \frac{Nu\lambda}{d_{вн}}$$

Определив коэффициент теплопередачи, сможем определить уточненное значение площади теплообменной поверхности F' . Если значения F и F' значительно расходятся, можно выбрать другую секцию или перекомпоновать рекуператор. Если ошибка невелика, уточняем температуру подогрева воздуха, применяя метод поиска решения (целевая ячейка $F - F'$, подбираемое значение температура воздуха).

Расчет рекуператора

Заканчиваем расчет определением максимальной температуры стенки рекуператора:

$$t_{ст.макс} = t'_d - \frac{1,3q}{\alpha_d}$$

где

$$q = K(t'_d - t''_e)$$

для противотока и

$$q = K(t'_d - t'_e)$$

для прямотока.