

# УТОЧНЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТОПОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

П.П. Антонов, А.М. Сидоров, А.С. Тюркин, Ф.В. Щербаков

*В работе предложен уточненный метод расчета топок НТКС, в которых реализуется внутренняя частичная газификация топлива.*

## Введение

Использование топки НТКС в форсированном режиме и с частичной газификацией потребовало коренной переработки методов расчета котельного агрегата.

### Выбор рабочих параметров топки НТКС

Для топок НТКС, при расчете опорными параметрами являются: температура в слое  $T_{\text{сл}}$  и скорость газов в слое  $W_{\text{сл}}$ . Но при работе топки НТКС с недостатком окислителя к этим двум параметрам добавляется третий – критическая температура начала газификации в слое, которая, как правило, отличается от рабочей температуры слоя.

Критическая температура достигается при близком стехиометрическому соотношению количества воздуха и топлива. Такое соотношение характерно для перехода топки из топочного режима в газогенераторный, при увеличении подачи топлива в слой, т.е. увеличении нагрузки котла до номинальной. Критическая температура достигается при избытках воздуха в слое порядка  $\alpha_{\text{сл}} \approx 1,1 \dots 1,2$ .

Любая топка НТКС, спроектированная для работы в газогенераторном режиме, на пониженных нагрузках работает с избытком окислителя, т.е. в топочном режиме. С повышением нагрузки (увеличение подачи топлива) температура в слое достигает критического значения. При дальнейшем увеличении подачи топлива в слой топка переходит в газогенераторный режим (с недостатком окислителя) и температура в слое начинает постепенно снижаться, причем чем выше нагрузка котла, тем ниже температура. Над слоем в значительной степени появляются продукты неполного горения: окись углерода  $\text{CO}$ , метан  $\text{CH}_4$ , водород  $\text{H}_2$ , а свободный кислород практически исчезает.

Переход в режим газификации для различных по конструктивному оформлению котлов происходит на различных нагрузках. Это зависит от теплофизических свойств сжигаемого топлива, а также от количества теплообменных поверхностей, находящихся в слое. Наличие этих поверхностей является необходимым условием работы топки «кипящего» слоя в газогенераторном режиме.

Рабочая скорость газов в слое  $W_{\text{сл}}$  должна быть выбрана с учетом надежного ожигения материала слоя во всем диапазоне регулирования нагрузки топки, который, при использовании режима газификации, может достигать трех-четырех кратного значения.

Задание оптимальной рабочей скорости газов в слое и его температуры во многом определяет надежную и стабильную работу котла с топкой НТКС. Но в первую очередь необходимо учитывать теплофизические свойства сжигаемого топлива, его реакционную способность.

Для безопасной, по условию спекания материала слоя, работы его температура для большинства топлив должна находиться не выше  $950^\circ\text{C}$ . Нижний предел температуры определяется устойчивостью горения углерода и должен быть выше  $850^\circ\text{C}$ . Верхнее ограничение появляется из-за опасности начала плавления частичек инертного материала и золы, приводящего к агломерации в объеме слоя в зонах возможного застоя.

Важнейшим с точки зрения надежности работы является и выбор скорости газов в сечении слоя. Она определяет надежность ожигения, долговечность оборудования топки (воздухораспределительная решетка, реактор «кипящего слоя» и пр.) и котла в целом. Для топок работающих в форсированном режиме, она выбирается из условия хорошего перемешивания топлива по сечению слоя с одной стороны и меньшего абразивного износа воздухораспределительных колпачков с другой. Обычно в пределах  $5 \div 10 \text{ м/с}$ . Уменьшение значения этой скорости приводит к неравномерному распределению горючих в слое, что повышает вероятность локальных перегревов и возможным шлакованием в зонах застоя.

При большой скорости газового потока в сечении слоя (более  $10 \text{ м/с}$ ) начинается интенсивный унос материала из «кипящего слоя» и увеличение доли уносимого из слоя топлива, для возврата которых необходимы сложные и дорогостоящие системы. Кроме того, необходимы воздухораспределительные решетки специальных конструкций.

Критическую температуру слоя мы задать не можем, она должна быть точно рассчитана.

#### Совершенствование методики расчета топок НТКС

В основе методики расчета положено уравнение баланса тепла в слое, которое включает в себя приход тепла и расход тепла.

*Тепло подводимое к слою:*

- тепло, выделяющееся при горении топлива в объеме кипящего слоя;
- физическое тепло, вносимое в слой псевдоожижающим воздухом и топливом;

*Тепло отводимое от слоя:*

- с продуктами сгорания, избыточным воздухом, золой и мелочью топлива, выносимыми из слоя;
- тепло, воспринимаемое поверхностями нагрева, контактирующими с материалом НТКС;
- тепло излучаемое напрямую в топку с поверхности слоя;
- тепло на прогрев уноса, возвращаемого в НТКС;
- тепло истраченное на испарение воды из топлива попадающего в слой, но сгорающего в надслоевом пространстве;
- тепло, выводимое из слоя со сливом золы (материала слоя).

Главную проблему составляет расчет доли топлива, реагирующего в слое и теплоотдача к поверхностям нагрева.

Обилие методик и математических уравнений, описывающих процессы горения частиц в слое в большинстве своем мало пригодны для практического расчета топок НТКС. Для практических расчетов связанных с проектированием новых и реконструкцией действующих котлов, ввиду резко переменных физических, теплофизических свойств, гранулометрического состава топлива и сложности процессов целесообразна разработка приближенной методики расчета.

Учитывая наличие опробованных методик для расчета выгорания пылеугольного факела [1], и методики расчета НТКС предложенной в [2] принято определять расход сгоревшего топлива в слое как разность между топливом, сгоревшим в слое, и сгоревшим в надслоевом объеме свежим топливом и возвращенным на дожигание уносом.

При поверочных расчетах топок НТКС балансовое уравнение целесообразно решать относительно постоянного избытка воздуха на выходе из слоя. Это связано с тем, что в методике расчета заданная температу-

ра слоя устанавливается при итерациях изменением расхода топлива, и при неизменной скорости газов в слое (расходе воздуха) и соответственно практически постоянных характеристиках уноса.

#### Оценка высоты расширенного слоя

Оценочное значение высоты расширенного слоя необходимо для определения количества поверхностей, контактирующих с активной зоной "кипящего" слоя. Так-так материал "кипящего" слоя (зола топлива и инертная насадка) имеет значительную полидисперсность фракционного состава, то значение высоты расширенного слоя величина относительная. Слой имеет несколько "размытую" границу перехода из объема слоя в надслоевую зону, где преобладают горячие газы с горящими частицами мелочи топлива, выносимой из слоя.

Данными для расчета высоты ожиженного слоя являются:

- высота насыпного слоя  $H_{нас}$ ;
- порозность насыпного слоя  $\epsilon_{нас}$ ;
- порозность ожиженного слоя  $\epsilon_{ож}$ .

Высота насыпного слоя выбирается из условия равномерного распределения температур по высоте слоя, исходя из предполагаемого гранулометрического состава слоя.

Порозность насыпного слоя определяется, как доля объема пустот между частицами в общем объеме слоя. Понятно, что порозность насыпного слоя всегда будет меньше порозности ожиженного слоя.

Оценочное значение высоты расширенного слоя определяется, м:

$$H_{ож.сл.} = H_{нас} \cdot \frac{(1 - \epsilon_{нас})}{(1 - \epsilon_{ож})}$$

Порозность насыпного слоя  $\epsilon_{нас}$  несколько ниже (ориентировочно на 10%), чем порозность слоя в момент начала псевдоожижения  $\epsilon_0$ , так как частицы уже несколько раздвинуты, взрыхлены

$$\epsilon_{нас} \approx 0,9\epsilon_{ож}$$

Для расчета начала псевдоожижения слоя из несферических частиц для расчета порозности насыпного слоя  $\epsilon_{нас}$  можно использовать приближенную формулу:

$$\epsilon_{нас} = \sqrt[3]{\frac{f}{14}}$$

где  $f$  – коэффициент формы частиц слоя, выбирается по опытным данным.

Коэффициенты формы некоторых материалов представлены в таблице 1, а их оценки приведены в таблице 2.

## УТОЧНЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТОПОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Таблица 1  
Коэффициенты формы  $f$  некоторых материалов [1]

№ п/п	Форма частиц, материал	Коэффициент формы $f$	
1	Округлые, окатанные, без резких выступов: глина, шамот, речной песок и т.д.	1,16-1,20	
2	Острозернистые, шероховатые, продолговатые: антрацит, неокатанный песок и т.д.	1,54	
3	Песок:	Круглый	1,20
		Угловатый	1,37
		Остроугольный	1,67
		Среднее значение для всех видов песка	1,33
4	Каменный уголь, $d=6\div 11,25\text{мм}$	1,87	
5	Гравий	$d=12\div 20\text{мм}$	1,47
		$d=3,7\text{мм}$	1,38
6	Щебень	$d=5\div 7\text{мм}$	1,85
		$d=25\div 30\text{мм}$	1,61

Таблица 2  
Оценка коэффициентов формы  $f$  некоторых частиц

№ п/п	Характеристика формы частиц	Коэффициент формы $f$
1	Округлые	1,30
2	Угловатой формы	1,52
3	Продолговатые	1,72
4	Пластинчатые	2,33

Величину порозности оживенного слоя,  $\varepsilon_{ож}$  можно приближенно оценить по интерполяционной формуле, описывающую изменение порозности в зависимости от скорости псевдоожижающего агента (критерия  $Re$ ). Опытные данные совпадают с расчетом по этой формуле.

$$\varepsilon_{ож} = \left( \frac{18 Re + 0,36 Re^2}{Ar} \right)^{0,21},$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;

$$Re = \frac{W_{сл} \cdot d_{экр}}{\nu_g},$$

где  $W_{сл}$  – скорость газа в слое, м/с;  $d_{экр}$  – эквивалентный диаметр частиц материала в слое, м;  $\nu_g$  – кинематическая вязкость газа,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $Ar$  – критерий Архимеда;

$$Ar = \frac{g \cdot d_{экр}^3 \cdot \rho_{мат}}{\nu_g^2 \cdot \rho_g},$$

где  $g=9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{мат}$  – действительная (истинная) плотность частичек материала в слое,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_g$  – плотность газа,  $\text{кг/м}^3$ .

Для определения эквивалентного диаметра  $d_{экр}$  и плотности  $\rho_{мат}$  частичек в слое необходим анализ расщепочных характеристик материала из “кипящего” слоя.

Анализ имеющихся расщепочных характеристик слива слоя показывает, что эквивалентный диаметр частиц материала слоя находится в интервале  $d_{экр}=1,0\div 1,5\text{мм}$ .

Средняя плотность материала слоя находится в интервале  $\rho_{мат}=1000\div 1500\text{кг/м}^3$ .

### Определение количества поверхностей, контактирующих с активной зоной “кипящего” слоя

Для снижения рабочей температуры слоя необходим ввод поверхностей нагрева в активную зону “кипящего” слоя, так как необходим дополнительный отвод тепла от слоя, для достижения малых избытков воздуха над слоем.

Количество поверхностей  $F_{пов}$  в слое оценивается исходя из конструктивных особенностей топки, высоты расширенного слоя  $H_{ож,сл}$ , теплофизических свойств сжигаемого топлива.

При выборе количества поверхностей в слое необходимо также учитывать опыт проектирования и эксплуатации котлов с топками НТКС. Оптимальное определение этой величины является очень важным этапом при расчете топки “кипящего” слоя, работающей в газогенераторном режиме.

При недостатке поверхностей нагрева будут иметь место повышенные температуры в слое, как следствие возможно шлакование при переходе в режим газификации (при достижении критической температуры).

При большом количестве поверхностей температура в слое будет недостаточной для устойчивого горения, особенно при снижении подачи топлива.

Поверхности в слое подвержены интенсивному абразивному износу материалом слоя, поэтому необходим ряд конструктивных мер по уменьшению износа.

При расчете поверхности в слое необходимо учитывать их тип (газоплотные, негазоплотные). После определения типа поверхности руководствуясь методом нормативного расчета котлов, определяют поверхность нагрева, учитывая соответствующие коэффициенты экранирования  $\chi$  для различных типов поверхностей.

Лучевоспринимающая (рабочая) поверхность нагрева определяется:

$$F_{пов,л} = \chi \cdot F_{пов},$$

где  $F_{пов}$  – расчетная поверхность нагрева не учитывающая тип и частоту расположения труб,  $\text{м}^2$ ;  $\chi$  – коэффициент экранирования.

Для газоплотных панелей  $\chi=1$ , для негазоплотных величина  $\chi$  определяется по нормативному методу расчета котлов.

**Тепловой баланс котла**

Составление теплового баланса котла заключается в установлении равенства между поступившим в котел количеством тепла и суммой полезно использованного тепла и тепловых потерь. Уравнение теплового баланса записывается в соответствии с нормативным методом расчета котлов. Исходными данными являются теплофизические характеристики сжигаемого топлива и определенные конструктивные параметры котла. Результатом теплового баланса котла с топкой НТКС (как и любого другого котла) являются определение всех составляющих потерь теплоты, коэффициента полезного действия (КПД) котла, полезного тепловосприятия рабочей среды в котле и расхода топлива. Также необходимо произвести расчет объемов и энтальпий продуктов сгорания для всех газоходов котла.

В результате теплового баланса котла определяются:

- полный расход топлива  $W_{пн}$ , кг/с;
- расчетный расход топлива  $W_{р}$ , кг/с;
- КПД котла  $\eta_k$ ;
- полезное тепловосприятие (нагрузка) котла  $Q_k$ , кВт (Гкал/ч);
- удельный расход топлива  $W_{уд}$  и удельный расход условного топлива  $W_{уд, усл.}$ , кг/с.

**Расчет уноса топлива из слоя**

Для сведения теплового баланса для «кипящего слоя» необходимо знать (хотя бы приближенно) количество топлива реагирующего в пределах расширенного слоя. Как правило, топливо, поступающее на горение, не имеет конкретного фракционного состава, наблюдается значительная полидисперсность фракционного состава исходного топлива. Поэтому определить долю топлива, сгорающего в слое, от всего поданного с достаточной для тепловых расчетов котлов точностью затруднительно. Существуют эмпирические зависимости, позволяющие с необходимой точностью оценить вынос материала из псевдооживленного слоя. Основной упор в этих уравнениях сделан на равенство сил аэродинамического сопротивления отдельной частицы и гравитации в восходящем потоке. Это равенство наступает для частиц определенного размера, они оказываются как бы в невесомости – витают. Предполагается что частицы, имеющие меньший размер покидают пределы слоя, а больший размер остаются в нем.

Наиболее подходящим для расчета уноса топлива из слоя является эмпирическая зависимость Тодеса [1]

$$Re_y = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}},$$

где  $Re_y$  – критерий Рейнольдса для уносимых частиц. Для

$$Re_y = \frac{W_{сл} \cdot d_{yn}}{\nu_g},$$

где  $W_{сл}$  – скорость газа в слое, м/с;  $d_{yn}$  – максимальный диаметр частиц, покидающих слой при данных условиях, м;  $\nu_g$  – кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с;  $Ar$  – критерий Архимеда для частиц, покидающих слой;

$$Ar = \frac{g \cdot d_{yn}^3 \cdot \rho_{об}}{\nu_g^2 \cdot \rho_g},$$

где  $\rho_{об}$  – объемная плотность частичек угля, кг/м<sup>3</sup>;

$$\rho_{об} = \frac{100 \cdot \rho_d}{100 + \left(\frac{\rho_d}{1000} - 1\right) \cdot W_{пред}} \cdot \frac{(100 - W_{пред})}{(100 - W_p)}$$

где  $\rho_d$  – действительная (истинная) плотность частиц топлива (в объеме плотной массы топлива без пор), кг/м<sup>3</sup>;

$$\rho_d = \frac{100 \cdot \rho_{орг}}{100 - A^c \cdot \left(1 - \frac{\rho_{орг}}{2900}\right)},$$

где  $\rho_{орг}$  – плотность органической массы топлива, кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho_{орг} = \frac{10^5}{0,344 \cdot C^p + 4,25 \cdot H^p + 23},$$

где  $C^p$ ,  $H^p$  – соответственно процентное содержание углерода и водорода в топливе, %;  $A^c$  – зольность на сухую массу топлива, %;  $W_{пред}$  – предельное содержание влаги в топливе (табличные или экспериментальные данные), %.

Из уравнения Тодеса определяется диаметр частиц  $d_{yn}$ , выносимых из слоя при данных условиях ( $W_{сл}$ ,  $T_{сл}$ ). Под  $d_{yn}$  следует понимать несколько условную величину, так как частицы угля имеют неправильную форму и различную плотность, поэтому равновесие (равенство сил аэродинамического сопротивления и гравитации) наступит для частиц различного размера.

Доля частиц (топлива), попадающих в слой определяем по уравнению Розина-Рамлера при коэффициенте полидисперсности исходного дробленого угля  $n=1$  (предположим для простоты) равна:

$$a = \exp\left(-d_{yn}/x_0\right)$$

где  $x_0$  – характеристика дробления топлива (эквивалентный диаметр), определяется по

## УТОЧНЕННЫЙ ТЕПЛОВЫЙ РАСЧЕТ ТОПОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

экспериментальным данным. Для большинства “дробленок” величина  $x_0$  находится в интервале 2,5÷5мм.

Если анализировать все имеющиеся рассеивочные характеристики угля, используемого для сжигания в топках с НТКС, то для большинства из них коэффициент полидисперсности  $n$  находится в интервале 0,95 – 1,05, поэтому, не делая большой ошибки для простоты расчетов мы принимаем его равным единице.

Количество топлива, реагирующего в слое определяется:

$$B_{сл} = B_n \cdot a - B_n \cdot a_2,$$

где  $a_2$  – доля топлива, подвергающаяся газификации в слое, задается при расчете.

### Расчет теплообмена с контактирующими поверхностями в слое

В системе теплообмена “кипящий” слой – поверхность нагрева участвуют все три составляющих теплообмена:

- конвекцией от омывающего поверхность газового потока;
- кондукцией от соприкосновения поверхности с горячими частичками материала слоя;
- излучением на поверхность нагрева более горячей среды “кипящего” слоя.

Поэтому расчетные формулы должны учитывать все три эти составляющие.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией и кондукцией определяется по эмпирической формуле, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_k = 0,8 \cdot \left( \frac{\lambda}{d_{экв}} \right) \cdot \left( 85Ar^{0,19} + 0,006Ar^{0,5} Pr^{0,33} \right),$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);  $Ar$  – критерий Архимеда для частиц слоя (определен в п.4);  $Pr$  – критерий Прандтля.

Коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_{и} = \frac{5,67 \cdot \varepsilon_{пр} (T_{сл}^4 - T_{пов}^4) \cdot 10^{-8}}{(T_{сл} - T_{пов})},$$

где  $T_{пов}$  – абсолютная температура поверхности нагрева в слое (близка к температуре рабочей среды);  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты системы слой-поверхность;

$$\varepsilon_{пр} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_{ст}} + \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{\varepsilon_m} - 1 \right) \right]^{-1},$$

где  $\varepsilon_{ст}$  – степень черноты ограждающих поверхностей, принимаем  $\varepsilon_{ст} = 0,8$  [3];  $\varepsilon_m$  – степень черноты слоя,  $\varepsilon_m \approx 0,8$  [3].

Тепло, снятое поверхностями нагрева от “кипящего” слоя, кВт:

$$Q_{пов} = (\alpha_k + \alpha_{и}) \cdot F_{пов.л.} \cdot (t_{сл} - t_{пов}).$$

### Тепловой баланс “кипящего” слоя

Точный расчет теплового баланса слоя необходим для надежной работы топки НТКС в требуемом температурном режиме. Он состоит из приходных и расходных составляющих тепла в слое. К приходным статьям тепла относятся: тепло от сжигаемого топлива, попадающего в слой и тепло, вносимое в слой оживающим воздухом. К расходным относят: тепло с продуктами сгорания; тепло, затраченное на нагрев материала, циркулирующего в системе возврата уноса, тепло затраченное на испарение влаги из топлива попадающего в слой но унесенного и сгоревшего над слоем и тепло со шлаком, уходящим в слив (потери с физическим теплом шлака).

Результатом теплового баланса топki работающей в газогенераторном режиме (как и в топочном) является определение необходимого количества воздуха которое необходимо подать под слой. Расчетная схема теплового баланса слоя представлена на рисунке 1.

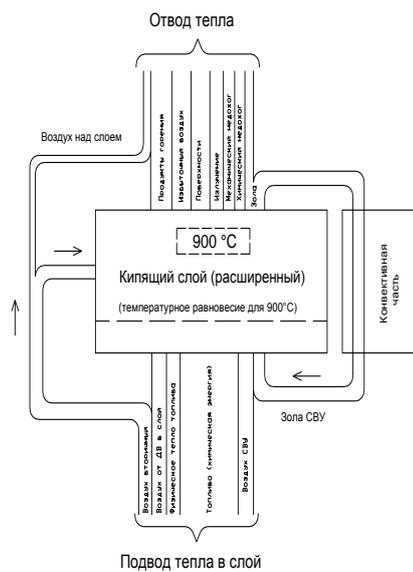


Рисунок 1 – Расчетная схема теплового баланса кипящего слоя

Уравнение теплового баланса для слоя:

$$Q_{топл.} + Q_{возд.} = Q_{пр.сг.} + Q_{пов.} + Q_{вл.} + Q_{сву} + Q_{шл.},$$

где  $Q_{топл.}$  – тепло от сгорания топлива, кВт;

$$Q_{топл.} = \frac{V_{под.сл.}}{3600 \cdot V_0^H} \cdot Q_p,$$

где  $V_{под.сл.}$  – расход воздуха под слой, м<sup>3</sup>/ч;  $V_0^H$  – теоретическое количество воздуха, м<sup>3</sup>/кг;  $Q_p$  – располагаемая теплота топлива, кДж/кг;

$$Q_p = Q_i^r + c_{мл} t_{мл},$$

где  $Q_i^r$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $c_{\text{тл}}$  – теплоемкость топлива, кДж/(кг·К).

Для твердых топлив имеем:

$$c_{\text{мл}} = 0,042 \cdot W_i^r + c_{\text{мл}}^d \cdot (-0,01 \cdot W_i^r)$$

Теплоемкость сухой массы топлива  $c_{\text{мл}}^d$ :

для бурых углей: 1,09 кДж/(кг·К) при 0°C и 1,26 кДж/(кг·К) при 100°C;

для каменных углей: 0,96 кДж/(кг·К) при 0°C и 1,09 кДж/(кг·К) при 100°C;

для антрацита и тощих углей – соответственно 0,92 и 0,96 кДж/(кг·К).

$t_{\text{тл}}$  – температура рабочего топлива, °C.

$Q_{\text{возд.}}$  – тепло, вносимое в слой с воздухом, кВт;

$$Q_{\text{возд.}} = \frac{V_{\text{под.сл.}}}{3600} \cdot (c_{\text{в}} t)_{\text{хв}};$$

где  $V_{\text{под.сл.}}$  – расход воздуха под слой, м<sup>3</sup>/ч;  $(c_{\text{в}} t)_{\text{хв}}$  – теплосодержание холодного воздуха, кДж/кг.

$Q_{\text{пр.сг.}}$  – расход тепла с продуктами сгорания из слоя, кВт;

$$Q_{\text{пр.сг.}} = \frac{V_{\text{под.сл.}}}{3600 \cdot V_0^H} \left( H_{0z}^H + \frac{A^p \cdot a_{\text{ун}}}{100} \cdot (ct)_{\text{зл}} \right),$$

где  $H_{0z}^H$  – энтальпия теоретического количества продуктов сгорания, кДж/кг;  $a_{\text{ун}}$  – доля уносимой золы с продуктами сгорания;  $(ct)_{\text{зл}}$  – энтальпия золы при температуре слоя, кДж/кг;  $Q_{\text{пов.}}$  – расход тепла из слоя на нагрев рабочей среды в поверхностях, расположенных в активной зоне слоя, кВт;  $Q_{\text{вп.}}$  – расход тепла на нагрев и испарение влаги в “лишнем” (несгоревшим из-за недостатка окислителя) топливе, кВт;

$$Q_{\text{вп.}} = \left( B_{\text{сл}} - \frac{V_{\text{под.сл.}}}{3600 \cdot V_0^H} \right) \cdot \frac{W^p}{100} \cdot (c_{\text{пар.}} - (c_{\text{вод}} t)_{\text{мл}})$$

где  $h_{\text{пар}}$  – энтальпия пара при температуре слоя и атмосферном давлении, кДж/кг;  $ct_{\text{вп.}}$  – теплосодержание влаги в подаваемом топливе, кДж/кг;  $Q_{\text{сву}}$  – расход тепла на нагрев циркулирующего материала в системе возврата уноса для систем с известным расходом золы через эжектора (если имеется), кВт;

$$Q_{\text{сву}} = \left( \frac{Q_{\text{эж}}}{3600} \left[ (ct)_{\text{зл}} - (ct)_{\text{зл}}^{\text{сву}} \right] \right) \cdot n_{\text{э}},$$

где  $Q_{\text{эж}}$  – средняя производительность одного эжектора, кг/с;  $(ct)_{\text{зл}}^{\text{сл}}$ ,  $(ct)_{\text{зл}}^{\text{сву}}$  – соответственно теплосодержания золы при температуре слоя и при температуре в СВУ, кДж/кг;  $(ct_{\text{в}})_{\text{сл}}$ ,  $(ct_{\text{в}})_{\text{сву}}$  – теплосодержания воздуха, кДж/кг;

$V_{\text{сву}}$  – расход воздуха на эжектор СВУ, м<sup>3</sup>/ч;  $n_{\text{э}}$  – эжекторов, установленных на котле.

При определении температуры в СВУ используется равновесная температура, которая определяется, °C:

$$t_{\text{сву}} = \frac{Q_{\text{э1}} c_{\text{зл}} t_1 + Q_{\text{э2}} c_{\text{зл}} t_2 + \dots + Q_{\text{эi}} c_{\text{зл}} t_i}{Q_{\text{э1}} c_{\text{зл}} + Q_{\text{э2}} c_{\text{зл}} + \dots + Q_{\text{эi}} c_{\text{зл}}},$$

где  $Q_{\text{э1}}$ ,  $Q_{\text{э2}}$ ,  $Q_{\text{эi}}$  – соответственно производительности 1-ого, 2-ого, i-ого эжекторов, кг/с;  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_i$  – соответственно температуры в газоходах котла, где установлена СВУ, °C;  $Q_{\text{шл}}$  – расход тепла из слоя со шлаком (слив слоя), кВт;

$$Q_{\text{шл}} = \frac{A^p}{100} \cdot (a_{\text{ун}})_{\text{шл}} \cdot (ct)_{\text{шл}},$$

где  $(ct)_{\text{шл}}$  – теплосодержание шлака, кДж/кг.

Из уравнения теплового баланса определяется количество воздуха, которое необходимо подать под слой, м<sup>3</sup>/ч:

$$V_{\text{под.сл.}} = 3600 \cdot A/B,$$

$$A = [Q_{\text{пов.}} + 0,01 W_p \cdot B_{\text{сл}} (c_{\text{пар.}} - (c_{\text{вод}} t)_{\text{мл}}) + Q_{\text{сву}} + Q_{\text{шл.}}]$$

$$B = \frac{Q_p - H_{0z}^H - 0,01 A_p \cdot a_{\text{ун}} \cdot (ct)_{\text{зл}} + 0,01 W_p \cdot (c_{\text{пар.}} - (c_{\text{вод}} t)_{\text{мл}})}{V_0^H}$$

$$(ct)_{\text{зл}}$$

Избыток воздуха в слое определится:

$$\alpha_{\text{сл}} = \frac{V_{\text{под.сл.}}}{3600 \cdot V_0^H \cdot B_{\text{сл}}}$$

Объем продуктов сгорания в сечении слоя, м<sup>3</sup>/с:

$$V_{\text{з.кс}}^H = \frac{V_{0z}^H \cdot V_{\text{под.сл.}}}{3600 \cdot V_0^H}$$

Расчетное сечение зеркала “кипящего” слоя в спокойном состоянии, м<sup>2</sup>:

$$f_{\text{кс}} = \frac{V_{\text{з.кс}}^H \cdot (73 + t_{\text{сл}})}{273 \cdot W_0}$$

### Расчет критической температуры слоя

Критическая температура в “кипящем” слое наступает при близком к стехиометрическому соотношению топлива и воздуха. При этом температура в слое достигает своего максимального значения при постоянном расходе воздуха и данном количестве теплообменных поверхностей в слое. Уравнение теплового баланса для слоя при этом будет таким:

$$Q_{\text{топл.}} + Q_{\text{возд.}} = Q_{\text{пр.сг.}} + Q_{\text{пов.}} + Q_{\text{сву}} + Q_{\text{шл.}}$$

Подставляя значения каждой величины (гл.7) в общее уравнение теплового баланса можно найти теоретическую (так как соотношение топливо – воздух стехиометрическое)

## УТОЧНЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТОПОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

энтальпию газов в слое при критической температуре:

$$H_{0z} = \frac{3600V_0^H (Q_{\text{топл}} + Q_{\text{возд}} - Q_{\text{пов}} - Q_{\text{сву}} - Q_{\text{шл}}) \cdot A^p}{V_{\text{под.сл}} \cdot 100} \cdot a_{\text{зн}} \cdot \left( \frac{t_{\text{зн}}}{t_{\text{зн}}} \right),$$

где  $(ct)_{\text{зн}}$  – теплосодержание золы при температуре в "кипящем" слое, кДж/кг. Величины  $Q_{\text{топл}}$ ,  $Q_{\text{возд}}$ ,  $Q_{\text{пов}}$ ,  $Q_{\text{сву}}$ ,  $Q_{\text{шл}}$  – определены ранее.

По предварительно рассчитанной таблице энтальпий определяется температура в слое.

### Расчет приходных и расходных статей тепла в слое

По приведенным выше формулам рассчитываются приходные и расходные статьи тепла в "кипящем" слое, и по результатам расчетов строится диаграмма распределения тепла в слое.

### Расчет воздухораспределительной решетки

Расчет воздухораспределительной решетки (ВРР) является одним из самых ответственных этапов при разработке конструкции топочного устройства с низкотемпературным «кипящим» слоем. ВРР должна исключать возможность шлакование слоя и сливных устройств во время работы котла, а также абразивный износ колпачков. При проектировании ВРР необходимо учитывать свойства и тип сжигаемого топлива определяющего её конструктивные особенности.

Исходными данными для выбора конструкции ВРР являются:

- расход воздуха, подаваемого под слой, необходимый для поддержания теплового баланса слоя;

- принятая конструкция воздухораспределительного колпачка (количество сопел  $n_{\text{соп}}$ , диаметр сопла в узком сечении  $d_{\text{соп}}$ );

- скорость воздуха в узком сечении сопла;

- геометрия расположения колпачков (шаги колпачков, расстояние от крайнего колпачка до обмуровки);

- соотношение длины и ширины ВРР.

Расход воздуха, подаваемого под слой, определяется из теплового баланса «кипящего» слоя.

При выборе скорости в сечении сопла колпачков необходимо учитывать аэродинамическое сопротивление ВРР и возможность абразивного износа колпачков. При задании малой скорости (менее 30 м/с), увеличивается расчетное количество колпачков и сечение ВРР, снижается ее аэродинамическое демпфирование.

При задании больших скоростей (более 60м/с) мы неоправданно увеличиваем аэродинамическое сопротивление ВРР, следствием чего является перерасход электрической энергии на дутьё. При больших скоростях возможен также абразивный износ колпачков.

При определении геометрии расположения колпачков важно также учитывать возможность абразивного износа.

Необходимо добиться более равномерного распределения воздуха по сечению слоя, важно не допустить наличия в слое так называемых "застойных" зон. Учитывая это, выбираются шаги колпачков в решетке и расстояние от крайнего колпачка до обмуровки.

Соотношение длины и ширины ВРР выбирается исходя из конструкции и геометрии котла.

### Расчет коридорного расположения колпачков

Коридорное расположение больше всего подходит при сжигании малозольных топлив. Такое расположение колпачков не рекомендуется при наличии в топливе большого количества комков. В этом случае требуется установка колпачков специальной конструкции – колпачков с направленным дутьем. Как правило, такие колпачки устанавливаются в шахматном порядке.

Расчетное количество колпачков:

$$n_{\text{к.р}} = \frac{4,07 \cdot V_{\text{под.сл}} \cdot \left( \frac{73 + t_{\text{жс}}}{t_{\text{жс}}} \right)}{\pi \cdot \left( \frac{a_p}{b_p} \right) \cdot W_{\text{соп}} \cdot n_{\text{соп}}},$$

где  $d_{\text{соп}}$  – диаметр сопла у колпачка в узком сечении, мм;  $W_{\text{соп}}$  – скорость воздуха в соплах колпачков,  $W_{\text{соп}}=40 \div 50$  м/с;  $n_{\text{соп}}$  – количество сопел у одного колпачка.

Длина воздухораспределительной решетки, м:

$$a_p = \sqrt{\left( \frac{a_p}{b_p} \right) \cdot f_{\text{кв}}},$$

где  $\left( \frac{a_p}{b_p} \right)$  - отношение длины к ширине решетки (предварительно задается);

Ширина воздухораспределительной решетки, м:

$$b_p = \frac{a_p}{\left( \frac{a_p}{b_p} \right)}.$$

Площадь решетки, м<sup>2</sup>:

$$F_p = a_p \cdot b_p.$$

Количество колпачков по длине решетки:

$$n_{\text{дл}} = \sqrt{\left( \frac{a_p}{b_p} \right) \cdot n_{\text{к.р}}}.$$

Количество по ширине:

$$n_{ш} = \frac{n_{к.р}}{n_{дл}}$$

Полученные значения  $n_{дл}$  и  $n_{ш}$  округляются до ближайших целых значений.

Общее количество колпачков:

$$n_k = n_{дл} \cdot n_{ш} \cdot 4 \cdot n_{тр.сл.}$$

где  $n_{тр.сл.}$  – количество труб слива.

Уточненное значение скорости в соплах колпачков, м/с:

$$W_{con} = \frac{4,07 \cdot V_{под.сл.} \cdot \sqrt{73 + t_{хв}}}{\pi \cdot d_{con} \cdot n_{con}}$$

Шаг колпачков по длине решетки, м:

$$h_{дл} = \frac{a_{реш} - 2 \cdot h_{кр}}{n_{дл} - 1}$$

Шаг по ширине решетки, м:

$$h_{ш} = \frac{b_{реш} - 2 \cdot h_{кр}}{n_{ш} - 1}$$

где  $h_{кр}$  – расстояние от оси крайнего ряда колпачков до стенки.

#### Шахматное расположение колпачков

При шахматном расположении колпачков с направленным дутьем шаги определяются, м:

$$h_{дл} = \frac{2 \cdot (a_{реш} - 2 \cdot h_{кр})}{n_{дл} - 1} \text{ - по длине;}$$

$$h_{ш} = \frac{b_{реш} - 2 \cdot h_{кр}}{n_{ш} - 0,5} \text{ - по ширине.}$$

Общий расход воздуха на котел равен, м<sup>3</sup>/ч:

$$V_{в.общ.} = 3600 \cdot \alpha_t \cdot B_n \cdot V_0^H,$$

где  $\alpha_t$  – коэффициент избытка воздуха в топке.

Расход вторичного воздуха на котел, м<sup>3</sup>/ч:

$$V_{в.втор.} = V_{в.общ.} - V_{под.сл.} - V_{пмз} - V_{сву},$$

где  $V_{пмз}$  – расход воздуха на поддув топлива в коробах ввода топлива. Определяется с учетом количества устанавливаемых питателей топлива. Для более равномерного распределения поступающего топлива по сечению слоя расход воздуха на один короб ввода должен составлять не менее 200 м<sup>3</sup>/ч.

$V_{сву}$  – расход воздуха на СВУ.

#### Выводы

Предложенная методика позволяет рассчитывать с высокой точностью тепловой баланс слоя. Определять критическую температуру начала газификации для высоковлажных топлив, при любом конструктивном оформлении топок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – М.: Энергия, 1973, – 295 с.
2. Пузырев Е.М., Сидоров А.М. и др. Проведение комплекса НИР и разработка методик по расчету и конструированию котлов с низкотемпературным кипящим слоем и внутритопочной циркуляцией // Отчет о НИР НПО ЦКТИ, заказ-наряд № 557-87/491801., Барнаул, 1988. – 183 с.
3. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник / Под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
4. Тепловые и атомные электрические станции : Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 624 с.
5. Скоростной безокислительный нагрев и термическая обработка в кипящем слое. Басаков А.П. – М.: Изд-во "Металлургия", 1968. – 223 с.