

УДК 51-74 / 621.184.244 / 621.184.822

МЕТОДИКА РАСЧЁТА НАГРУЗОК НА ХОЛОДНУЮ ВОРОНКУ КОТЛА**Курепин М.П., Сербиновский М.Ю.***ОАО «Таганрогский котлостроительный завод «Красный котельщик», Таганрог,
e-mail: Kurepin_MP@tkz.power-m.ru, Serbinovskiy_MY@tkz.power-m.ru*

Настоящая статья посвящена совершенствованию методики расчёта нагрузок на экраны холодной воронки пылеугольного энергетического котла с учетом сыпучих свойств котельного шлака и распределения шлака по фронтальным наклонным стенкам холодной воронки. Предложенная методика позволяет учитывать воздействие на экраны от шлака как сыпучего тела с учетом его физико-механических характеристик, угла наклона стенок холодной воронки, расчетных вариантов распределения шлака в воронке, избыточного давления или разрежения в топке котла и воздействия на стенки хлопка топочных газов с избыточным давлением или разрежением. Представлен алгоритм расчета и программа расчета нагрузок на экраны холодной воронки для программного комплекса ANSYS, позволяющая автоматизировать данный расчёт при моделировании напряженно-деформированного состояния холодной воронки. Предложенная методика апробирована в ходе реального проектирования при моделировании напряженно-деформированного состояния холодной воронки парового котла мощностью 600 МВт и паропроизводительностью 1710 тонн пара в час. Показано, что методика позволяет повысить точность моделирования напряженно-деформированного состояния экранов холодной воронки с их опорной системой и может служить одним из инструментов оптимизации конструкции опорной системы.

Ключевые слова: методика расчёта нагрузок, холодная воронка котла, котельный шлак, моделирование напряженно-деформированного состояния, пылеугольный энергетический котёл, программа расчета нагрузок, экраны холодной воронки котла

BOILER DRY-BOTTOM ASH HOPPER LOAD CALCULATION METHODS**Kurepin M.P., Serbinovskiy M.Y.***Public Joint Stock Company «The Taganrog Boiler-Making Works «Krasny Kotelshchik», Taganrog,
e-mail: Kurepin_MP@tkz.power-m.ru, Serbinovskiy_MY@tkz.power-m.ru*

This study is dedicated to improving the load calculation methods for dry-bottom ash hopper walls of pulverized coal-fired power boiler with regard to granular properties of boiler slag and slag distribution in the inclined front walls of the dry-bottom ash hopper. The suggested methods allow accounting for the action on the water walls of the slag as granular material with regard to its physical and mechanical properties, of angle of inclination of the dry-bottom ash hopper, design cases of slag distribution in the dry-bottom ash hopper, excessive or negative pressure in the Boiler furnace and action on the walls of the flue gas «puff» with excessive or negative pressure. Calculation algorithm as well as dry-bottom ash hopper wall load calculation program for the ANSYS software complex is given; this program allows automating the calculation at simulation of the stress-strain state of the dry-bottom ash hopper. The suggested method was tried out in the actual design process while simulating the stress-strain state of the dry-bottom ash hopper of 600 MW Steam Boiler with 1710 t/h steam capacity. It was demonstrated that the method allows increasing the accuracy of simulation of the stress-strain state of the dry-bottom ash hopper walls with their supporting system and can serve as one of the tools to improve the supporting system design.

Keywords: load calculation methods, boiler dry-bottom ash hopper, boiler slag, simulation of stress-strain state, pulverized coal-fired power boiler, load calculation program, boiler dry-bottom ash hopper water walls

Холодная воронка – нижняя часть топки с твердым шлакоудалением, предназначенная для отвода твердого шлака в систему золошлакоудаления [2]. Холодная воронка обеспечивает организацию непрерывного сбора, перемещения и собственно отвода через нижнее отверстие в систему золоудаления золы и шлака за счет их собственного веса. Конструктивно холодная воронка – цельносварной бункер в виде перевёрнутой усеченной пирамиды. Обычно две противоположные фронтальные стенки имеют угол наклона, достаточный для свободного скольжения золы и шлака, а две другие – вертикальны. Холодная воронка с их опорной системой находится в сложном напряженном состоянии, на которое непосредственно влияют нагрузки от шлака, давления в топке и хлопка. Моде-

лирование напряженно-деформированного состояния воронки, выбор и оптимизация её конструкции вместе с опорной системой – сложная задача для конструктора, требующая точного задания нагрузок.

В настоящее время нет достаточно полной методики расчёта нагрузок на экраны холодной воронки с учетом воздействия на экраны шлака как сыпучего тела. В связи с этим возникает проблема корректности задания усилий на экраны при проектировании холодной воронки и моделировании её напряженно-деформированного состояния. Проблема корректности задания усилий, воздействующих на экраны воронки, была решена путём дополнения нормативной методики следующим образом. Нормами [3, 4] определены следующие расчетные нагрузки: внутреннее давление, собствен-

ный вес и вес шлака, наддув или разрежение, нагрузки от неравномерного распределения температуры по сечению трубы, хлопок в топке (временная нагрузка), сейсмические нагрузки (особая нагрузка), поэтому задание этих нагрузок в модели не сложно. Так, например, в нормах нагрузок на каркасы котлов указано, что уровень заполнения шлаком холодной воронки следует принимать в 30% её объёма для котлов производительностью до 1000 т/ч и 15% объёма – при производительности свыше 1000 т/ч [3, 4]. Отметим, что некоторые из нагрузок (собственный вес) учитываются при моделировании в современных программных комплексах, таких как ANSYS, автоматически [1], другие (например, наддув) задаются при помощи стандартных средств программы. Но не определено распределение нагрузки от веса шлака по стенкам (экранам) холодной воронки, кроме того, не учитывается нагрузка от слоя шлака на стенки верхней (не заполненной шлаком) части воронки. На рис. 1 и 2 показаны расчётные схемы 1 и 2 с вариантами заполнения шлаком холодной воронки и воздействием его на наклонные экраны, показана половина симметричного разреза по осям фронтальных экранов.

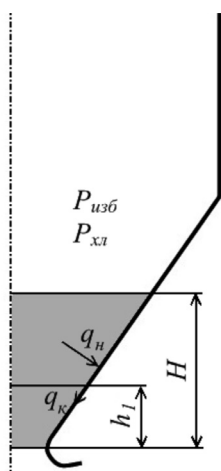


Рис. 1. Расчётная схема 1 – полное заполнение шлаком только нижней части воронки, q_n и q_k – соответственно, нормальное давление и касательное удельное усилие от шлака на наклонную поверхность фронтальных экранов воронки, $p_{изб}$ и $p_{хл}$ – соответственно, избыточное давление в топке и воронке и давление от хлопка топочных газов, h_1 – текущее значение высоты столба шлака, H – высота верхней границы шлака в воронке

Шлак – сыпучий материал, поэтому определение нагрузок от веса шлака на

стенки воронки проводили по аналогии с определением нагрузок от веса сыпучих материалов в призматических бункерах [5, С. 383–86]. Угол наклона стенок холодной воронки α выбирается с учетом угла естественного откоса шлака φ для обеспечения бесперебойного ссыпания и последующего непрерывного удаления шлака из выпускного отверстия воронки:

$$\alpha = \varphi + c,$$

где c – рекомендуемая нормативная добавка, $c = 5 \div 10^\circ$.

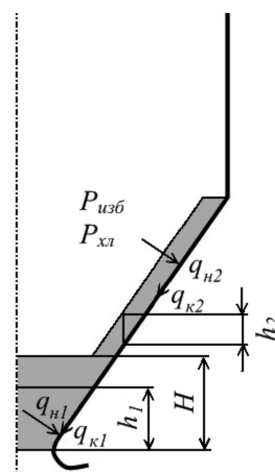


Рис. 2. Расчётная схема 2 – полное заполнение шлаком нижней части воронки и слой шлака на фронтальных экранах, q_{n1} и q_{n2} – соответственно, нормальное давление шлака на поверхность фронтальных экранов в нижней части воронки и слоя шлака в верхней части, q_{k1} и q_{k2} – соответственно, касательное удельное усилие от шлака на поверхность фронтальных экранов в нижней и верхней частях воронки, $p_{изб}$ и $p_{хл}$ – соответственно, избыточное давление в топке и воронке и давление от хлопка топочных газов, h_1 и h_2 – соответственно, текущее значение высоты столба шлака в нижней и высота столба шлака в верхней частях воронки, H – высота верхней границы шлака в воронке

Нормативное нормальное давление q_n сыпучего тела на наклонную поверхность заполненной части бункера определяется по формуле [5, С. 384]:

$$q_n = p^n \sin^2 \alpha + q^n \cos^2 \alpha,$$

где горизонтальное (p^n) и вертикальное (q^n) нормативные давления сыпучего материала определяются по формулам:

$$p^n = nk\gamma h \text{ и } q^n = n\gamma h,$$

здесь γ – объемный вес шлака, h – высота столба шлака, принимается равной h_1 или h_2

для нижнего и верхнего участков нагружения (см. рис. 1 и 2), h_1 изменяется от 0 до H , h_2 задаётся постоянной или заданной функцией распределения шлака; k – отношение горизонтального давления к вертикальному, равное

$$k = p^u/q^u = tg^2(45 - \varphi/2),$$

а коэффициент перегрузки n принимается равным 1,3.

нормативному давлению от веса сыпучего материала, $p_{изб}$ и $p_{хл}$ постоянны для поверхностей экранов:

$$q^u = n\gamma h + p_{изб} + p_{хл},$$

тогда

$$q_n = q^u \cdot (k \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha).$$

На поверхности экранов верхней части холодной воронки, покрытой слоем

Параметры сухого котельного шлака [5, С. 385]

Плотность, γ , кг/м ³	Угол естественного откоса, φ , °	Параметр k	Коэффициент трения f по стали
600÷1000	35÷50	0,271÷0,132	0,4

Кроме нормального давления на стенки воронки действует удельное касательное усилие q_k , равное

$$q_k = (q^u - p^u) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = n\gamma h \cdot (1 - k) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha.$$

Нагрузки q_n и q_k рассчитываются отдельно для нижнего (индексы 1) и верхнего (индексы 2) участков нагружения (см. рис. 1 и 2).

В ходе моделирования напряженно-деформированного состояния холодной воронки задавали нормальное давление на стенки (экраны) от воздействия избыточного давления в топке, которое может быть как положительным при работе котла под наддувом, так и отрицательным при работе котла под разрежением. Задавали избыточное давление от хлопка в топке при расчете с учетом временных нагрузок или соответствующее разрежение от обратного хлопка. Для поверхностей экранов нижней части холодной воронки, заполненной шлаком, задавали нормальное давление и удельное касательное усилие, рассчитанное по вышеприведенной методике с учетом сыпучих свойств котельного шлака. При этом избыточное давление (разрежение) в топке $p_{изб}$ и давление от временного хлопка $p_{хл}$ прибавляются к вертикальному

шлака заданной толщины, определяли и использовали в исходных данных моделирования нормативное нормальное давление q_n и удельное касательное усилие q_k . Нормальное давление от слоя шлака суммировали с избыточным давлением в топке $p_{изб}$ и давлением от временного хлопка $p_{хл}$.

$$q^u = n\gamma h,$$

тогда

$$q_n = q^u \cdot (k \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) + p_{изб} + p_{хл},$$

где t – толщина слоя шлака на поверхности экрана. Удельное касательное усилие определяли для движущегося слоя шлака как

$$q_k = n\gamma t f \cdot \cos \alpha,$$

здесь f – коэффициент трения шлака по поверхности экрана, для неподвижного слоя как

$$q_k = n\gamma t \cdot \cos \alpha.$$

На основе предложенной методики расчета нагрузок на экраны холодной воронки разработаны алгоритм расчета и программа – макрос для автоматизации расчета нагрузок на холодную воронку при моделировании её напряженно-деформированного состояния с помощью программного комплекса ANSYS.

МАКРОС

*DIM,hShlak,ARRAY,2

hShlak(1) = 0.8

hShlak(2) = 0

pIzb = 0

pHlop = 8730

mZola = 1400*9.81

nPere = 1.2

kFi = 0.333

alpha = 55

*DIM,pNorm,ARRAY,nZola (1,1)-nZola (3,1),4

*DIM,pKst, ARRAY,nZola (1,1)-nZola (3,1),4

*DO,i,1,4

! толщина шлака

! избыточное давление в топке (наддув), Па
! давление хлопка, Па

! коэффициент запаса
! коэффициент k
! угол ската воронки

```

*IF,i,EQ,1,OR,i,EQ,3,THEN $      k = 1 $ *ELSE $ k = 2 $ *ENDIF ! итерации по вариантам
распределения золы
*IF,i,EQ,1,OR,i,EQ,2,THEN $      t = 0 $ *ELSE $ t = 1 $ *ENDIF ! итерации по нагрузкам

cy1 = ekrSt_C0+ekrSt_cy(nekrSt-1)+ekrSt_cy(nekrSt)
cy2 = cy1+ekrSt_cy(nZola (1,1))

*DO,j,1,nZola (1,1)-nZola (3,1)
  *IF,j,GT,nZola (1,k)-nZola (2,k),THEN $      m=1 $ *ELSE $      m=0 $ *ENDIF
! итерации по 2-м зонам заполнения шлаком экрана (2-я – это шлак на стенке до верха XB)
  jhZola = 0.5*(cy2-cy1)+hZola(k)-cy2
  jhZola = jhZola – m*(jhZola – hShlak(k)/cos(PI*alpha/180))
  pNorm(j,i) = (nPere*mZola*jhZola+(1-m)*pIzb+t*(1-m)*pHlop)*(kFi*sin(PI*alpha/18
0)*sin(PI*alpha/180)+cos(PI*alpha/180)*cos(PI*alpha/180))+m*pIzb+t*m*pHlop
  pKst(j,i) = (nPere*mZola*jhZola+(1-m)*pIzb+t*(1-m)*pHlop)*(1-kFi)*sin(PI*alpha/1
80)*cos(PI*alpha/180)+m*pIzb+t*m*pHlop
  *IF,k,EQ,2,AND,m,EQ,1,THEN
    pKst(j,i) = 0
  *ENDIF
  cy1 = cy2
  cy2 = cy2 + ekrSt_cy(nZola (1,k)-j)
*ENDDO
*ENDDO

```

В Макросе задаётся распределение нормального и касательного (массивы pNorm и pKst соответственно) давления шлака, избыточного давления и давления хлопка по высоте экрана по участкам. Формируется две комбинации нагрузок: вес золы и избыточное давление для 2 вариантов распределения золы (первый и второй индексы массивов) и вес золы, избыточное давление и давление хлопка для 2 вариантов распределения золы (третий и четвёртый индексы массивов). В нашем случае воронка разбита на участки длиной от 150 до 300 мм, отметки участков содержатся в массиве nZola, а длины участков – в массиве ekrSt_cy. В макросе для каждого участка определяются координаты верхней и нижней точек (cy1, cy2) и высота шлакового столба (jhZola) после чего вычисляются значения нормального и касательного давления по участкам. Вычисленные значения нагрузок задаются далее на конечные элементы участков (должны быть выбраны предварительно) следующим образом:

```
sfe,all,1,PRES, ,pNorm(j,i)
```

Касательные нагрузки задаются с помощью поверхностных элементов командами:

```
esurf
sfe,all,3,PRES, ,pKst(j,i)
```

Предложенная методика расчета нагрузок на экраны холодной воронки апробирована при моделировании напряженно-деформированного состояния холодной воронки парового котла мощностью 600 МВт и производительностью 1710 тонн пара в час.

Выводы

1. Предложена методика расчета нагрузок на экраны холодной воронки, позволя-

ющая учитывать распределение шлака на наклонных стенках воронки и его силовое воздействие на экраны, повысить точность моделирования напряженно-деформированного состояния экранов холодной воронки с их опорной системой и может служить одним из инструментов оптимизации конструкции опорной системы.

2. Предложенная методика расчета нагрузок на экраны холодной воронки позволяет учитывать воздействие на экраны от шлака как сыпучего тела с учетом его физико-механических характеристик, угла наклона стенок холодной воронки α и распределения шлака в воронке.

3. Разработанный на основе предложенной методики макрос для программного комплекса ANSYS позволяет автоматизировать расчет нагрузок на холодную воронку при моделировании её напряженно-деформированного состояния.

Список литературы

1. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
2. ГОСТ 23172-78. Котлы стационарные. Термины и определения / Межгосударственный стандарт – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 24 с.
3. ОСТ 108.031.107-78. Котлы паровые стационарные. Стальные конструкции. Нормы нагрузок на каркасы // Отраслевой стандарт – Л.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1979. – 16 с.
4. РТМ 108.031.108-78. Котлы стационарные паровые и водогрейные. Расчет на прочность цельносварных газоплотных конструкций // Руководящий технический материал – Л.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1985. – 165 с.
5. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Металлические конструкции промышленных зданий и сооружений / Под ред. Н.П. Мельникова. – М.: Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам (Гостройиздат), 1962. – 618 с.