

УДК 532.529: 517.4

Б.Б.Рохман, докт.техн.наук (Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев)

Численный анализ различных схем реконструкции существующей системы пылеприготовления при переводе парогенератора ТП-100 с АШ на газовый каменный уголь

Проанализированы три варианта реконструкции системы пылеприготовления котлоагрегата ТП-100 для сжигания ГСШ относительно взрывобезопасности пылесистемы и диапазона регулирования нагрузки парогенератора. Эти схемы отличаются между собой способом сушки угля. Показано, что воздушная сушка не обеспечивает достаточно высокий уровень взрывобезопасности пылесистемы даже при поддержании нормативной температуры аэросмеси в пределах 70°C, а также не позволяет снижать нагрузку ниже 140 МВт. При газозвушной сушке содержание O_2 (по объему) < 16%, что оказывает существенное влияние на температурный уровень в ошипованной зоне и приводит к значительному сужению диапазона регулирования парогенератора по сравнению с воздушной. Показано, что наиболее эффективной схемой является сушка угля дымовыми газами со сбросом сушильного агента в охлажденную зону. Эта схема позволяет значительно расширить диапазон регулирования нагрузки парогенератора с 120 до 200 МВт при содержании в дымовых газах O_2 < 10%, что обеспечивает высокий уровень взрывобезопасности. Библ. 4, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: парогенератор, сушка, система пылеприготовления, уголь, ошипованная зона, сушильный агент, шлак, горелка.

ORCID: 0000-0002-1270-6102

Согласно Указу Президента Украины №37/2017 "О решении Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16 февраля 2017 года "О неотложных мерах по нейтрализации угроз энергетической безопасности Украины и усилении защиты критической инфраструктуры", необходимо в ближайшее время произвести реконструкцию существующих энергоблоков тепловых электростанций и теплоэлектроцентралей, на которых используется уголь антрацитовой группы, для сжигания ими газового каменного угля ГСШ Львовско-Волынского бассейна.

Каменный уголь ГСШ с высоким выходом летучих относится к категории взрывоопасных топлив, поэтому размалывать его в существующей системе пылеприготовления парогенератора ТП-100 не представляется возможным, так как она была спроектирована под взрывобезопасный уголь антрацитовый штывб.

В настоящей работе с использованием нормативных материалов [1–4] численно исследованы три схемы реконструкции пылесистемы парогенератора ТП-100, предназначенные для сжигания обогащенного каменного угля марки Г сле-

дующего состава (на рабочую массу): углерод $C^p = 60,77\%$, водород $H^p = 3,87\%$, азот $N^p = 1,1\%$, кислород $O^p = 5,11\%$, сера $S^p = 1,39\%$, зола $A^p = 18,86\%$, влага $W^p = 8,9\%$, низшая теплота сгорания угля $Q_n^p = 5684$ ккал/кг, выход летучих на горючую массу $V^{daf} = 38,7\%$. Эти схемы отличаются между собой способом сушки угля. В качестве сушильного агента используются воздух, дымовые газы и их смесь.

Цель настоящей работы – выбрать наиболее эффективную схему реконструкции системы пылеприготовления котлоагрегата ТП-100, которая обеспечивала бы высокий уровень взрывобезопасности и устойчивый режим жидкого шлакоудаления в широком диапазоне регулирования нагрузки парогенератора 120-200 МВт.

Отсюда вытекают пять основных задач:

1. Выбор сушильного агента и его параметров, обеспечивающих взрывобезопасность пылесистемы.
2. Очистка отработанного сушильного агента от мелкодисперсной пыли.
3. Выбор места ввода отработанного сушильного агента в топку парогенератора ТП-100.

4. Выбор транспортирующего агента, его параметров и устройства для транспортировки мелкодисперсной пыли от промежуточного бункера пыли до основных горелок.

5. Обеспечение устойчивого жидкого шлакоудаления в диапазоне изменения нагрузки парогенератора ТП-100 от 60 до 100%.

Описание котлоагрегата ТП-100. Парогенератор ТП-100 с естественной циркуляцией среды был сконструирован для сжигания пыли антрацитового штыба калорийностью 6010 ккал/кг и предназначен для работы в блоке с турбиной 200 МВт (рис. 1). Основные технические характеристики парогенератора: производительность по пару – 640 т/ч, давление пара в барабане – 155 атм, температуры первичного и вторичного пара на выходе из парогенератора – 570°C. В процессе эксплуатации указанные температуры пара были понижены до 545°C. Котлоагрегат имеет Т-образную компоновку с жидким шлакоудалением. Топка разделена двухсветным экраном на две равные части. В экране предусмотрены отверстия для выравнивания давления газовой смеси. В каждой части корпуса топки располагается по одной летке для удаления жидкого шлака. Края летки защищены змеевиками с пропуском по ним технической воды. Холодные воронки и экраны выше горелок утеплены с помощью ошиповки и хромитовой массы.

Пылеугольные горелки устанавливаются с фронта и сзади в два яруса в количестве 16 штук (рис. 1, поз. 20). Выше основных горелочных устройств расположены восемь сбросных горелок, поз. 19. Все экраны выполнены из труб наружным диаметром 60 мм и шагом 64 мм. Отвод пароводяной смеси из боковых экранов топки осуществляется обогревательными трубами диаметром 133×10 мм. Все опускные трубы, выходящие из барабана парогенератора, имеют диаметр 159×13 мм. В барабане предусмотрена трехступенчатая паросепарация: механические циклоны, барботаж пара через слой питательной воды и пластинчатый сепаратор.

По ходу газов в горизонтальном газоходе располагаются: ширмовый пароперегреватель (ШПП), поз. 22, выходные ступени острого (КПП2), поз. 23 и вторичного пара (ППП2), поз. 24, первые ступе-

ни вторичного (ППП1), поз. 25 и первичного пара (КПП1), поз. 26. В конвективной шахте, поз. 30: регулировочная ступень промежуточного пароперегревателя, поз. 27, трубчатый воздухоподогреватель (ТВП), поз. 28, водяной экономайзер (ЭК), поз. 29 и регенеративный вращающийся воздухоподогреватель (РВП) 31.

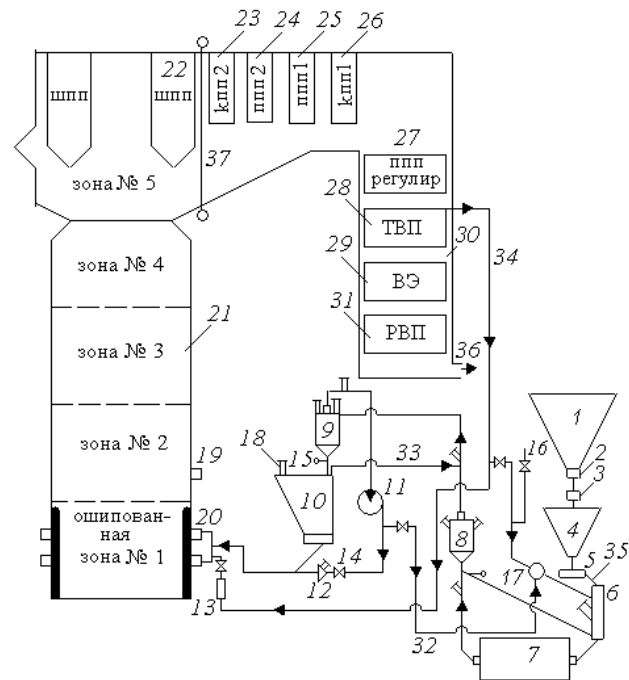


Рис. 1. Схема реконструкции индивидуальной системы пылеприготовления котлоагрегата ТП-100 с промежуточным бункером пыли и шаровой барабанной мельницей ШБМ-50 и воздушной сушкой обогащенного каменного угля марки Г: 1 – бункер угля; 2 – отсекающий шибер; 3 – автовесы; 4 – весовой бункер; 5 – питатель угля; 6 – нисходящая сушилка; 7 – шаровая барабанная мельница; 8 – сепаратор; 9 – циклон; 10 – бункер пыли; 11 – мельничный вентилятор; 12 – короб первичного воздуха; 13 – короб вторичного воздуха; 14 – клапан; 15 – мигалка; 16 – клапан присадки холодного воздуха; 17 – смеситель; 18 – взрывной клапан; 19 – сбросные горелки; 20 – основные горелки; 21 – топка; 22 – ширмовый пароперегреватель (ШПП); 23 – выходная ступень острого пара (КПП2); 24 – выходная ступень вторичного пара (ППП2); 25 – первая ступень вторичного пара (ППП1); 26 – первая ступень первичного пара (КПП1); 27 – регулировочная ступень промежуточного пароперегревателя; 28 – трубчатый воздухоподогреватель (ТВП); 29 – водяной экономайзер (ЭК); 30 – конвективная шахта; 31 – регенеративный вращающийся воздухоподогреватель (РВП); 32 – трубопровод рециркуляции; 33 – трубопровод влагоотсоса; 34 – трубопровод горячего воздуха; 35 – течка сырого угля; 36 – уходящие газы; 37 – подвесные трубы (фестон).

Из барабана первичный насыщенный пар поступает в коллектор и затем по крайним пакетам потолочных труб направляется в крайние трубные пакеты перегревателя КПП1, расположенные в пристеночной зоне горизонтального газохода. Далее по необогреваемым трубам пар поступает в радиационную поверхность РПП, расположенную в виде сплошного пояса, состоящего из горизонтальных труб, опоясывающих оба корпуса топки выше горелок и прикрепленных к испарительным экранам. Здесь осуществляется весьма сложное перекрещивание паровых потоков, при котором часть пара направляется в другую сторону по ширине газохода, а остальной пар перебрасывается из одного конвективного газохода в другой. Далее первичный пар проходит через средние змеевиковые трубные пакеты КПП1, затем по средним пакетам потолочных труб направляется в средние пакеты ШПП, за которыми находятся первые горизонтальные впрыскивающие пароохладители, расположенные параллельно барабану. В них происходит переброс пара с левой половины газохода в правую и наоборот. Далее пар движется по крайним трубным пакетам ширм и затем по крайним пакетам змеевиков КПП2. После второго пароохладителя пар снова перебрасывается справа налево и наоборот, проходит средние пакеты КПП2 и затем по отводящим трубам поднимается в камеры, из которых направляется в турбину.

Вторичный пар на пониженных нагрузках последовательно проходит регулировочную ступень промежуточного пароперегревателя, первую ППП1 и вторую ППП2 ступени вторичного пара. При номинальной нагрузке пар минует регулировочный пакет ППП.

Описание существующей пылесистемы. Согласно паспорту парогенератора ТП-100 он укомплектован индивидуальной полуразомкнутой системой пылеприготовления с промежуточным бункером пыли и шаровой барабанной мельницей ШБМ-50. На блоке устанавливаются две нитки приготовления пыли. В качестве сушильного агента используется смесь из 79% горячего воздуха, отобранного после трубчатого воздухоподогревателя с температурой 398°C и 21% отработанного рециркулирующего запылен-

ного сушильного агента с температурой 160°C. Из бункера сырого угля влажное топливо в количестве 43,75 т/ч (на одну мельницу) с помощью питателя подается в нисходящую сушилку, где происходит его сушка и испарение 40% исходной влаги в объеме воздуха, после чего сушильный агент с температурой 224°C и дисперсный поток с температурой 90°C направляются в ШБМ-50, в которой дробленный уголь размалывается до пылевидного состояния. Далее газозвесь транспортируется по пылепроводу в сепаратор, где мелкие частицы отделяются от крупных. Последние возвращаются в мельницу на домол, а мелкодисперсная пыль и газы вводятся в циклон, где газ отделяется от частиц. Мелкодисперсная фаза направляется в промежуточный бункер пыли, а запыленный сушильный агент с помощью мельничного вентилятора в количестве 97000 м³/ч с температурой 160°C подается в сбросные горелки и 19500 м³/ч агента направляется на рециркуляцию.

В целом пылесистема работает под разрежением, кроме тракта мельничный вентилятор – сбросные горелки. Согласно нормативным материалам [2] коэффициент присоса холодного воздуха при тепловых расчетах принимался 20% от весового количества сушильного агента на входе в пылесистему.

Транспорт пыли из промежуточного бункера к основным горелкам осуществляется при помощи первичного воздуха под напором, который обеспечивается вентилятором горячего дутья типа ВГД-20. Дозирование пыли к основным горелкам производится с использованием лопастных пылепитателей с регулируемым числом оборотов ротора. На каждую горелку устанавливается один пылепитатель и один пылепровод. Концентрация пыли в газодисперсном потоке составляет 0,7 кг/кг, его температура – 299°C, расход твердой фазы на один пылепровод – 4,58 т/ч.

Анализ работы системы пылеприготовления и парогенератора ТП-100 при воздушной сушке каменного угля (рис. 1). При воздушной сушке каменного угля ГСШ температура отработанного сушильного агента не должна превышать 70°C [2–4]. При работе парогенератора ТП-100 на нагрузке 200 МВт сушильный агент на входе в пылесистему формируется за счет 45% (от коли-

чества сушильного агента на входе в пылесистему) горячего воздуха, отобранного после трубчатого воздухоподогревателя с температурой 376°C , поз. 34, 25% холодного воздуха, поз. 16 и 30% рециркулирующего отработанного сушильного агента с температурой 70°C , поз. 32 (таблица 1, вариант 1). Транспорт пыли к основным горелкам осуществляется 70% отработанного запыленного сушильного агента с температурой 70°C . Температура на выходе из ошипованной зоны равна 1651°C , жидкого шлака – 1485°C . Запас по температуре жидкого шлака (разница между температурой жидкого шлака и температурой нормального жидкого шлакоудаления 1450°C) составляет 35°C . Этот запас недостаточен для того, чтобы разгрузить парогенератор ТП-100 до 120 МВт. Для наращивания указанного запаса уменьшим расход сушильного агента с $118769 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $79314 \text{ м}^3/\text{ч}$ (таблица 1, вариант 2). Это повлечет за собой повышение температуры сушильного агента на входе в пылесистему с 201°C до 266°C за счет уменьшения расхода холодного воздуха с 25% до 6%. В результате коэффициент избытка воздуха в основных горелках понизится с 1,12 до 1,05, вследствие чего температура жидкого шлака поднимется до 1516°C , а величина рассматриваемого запаса возрастет до 66°C , что обеспечит устойчивое жидкое шлакоудаление в интервале нагрузок 140-200 МВт. Однако второй вариант имеет существенный недостаток по сравнению с первым. Если в варианте 1 скорости газа в пылепроводах лежат в требуемых диапазонах, выбранных из условия невыпадения пыли на стенки пылепроводов, то в варианте 2 значения скоростей газа в пылепроводах оказываются ниже нижней границы указанных диапазонов, что повлечет за собой выпадение пыли на стенки труб с последующим ее возгоранием и взрывами в пылесистеме. Для устранения этой опасности необходимо произвести значительную реконструкцию пылесистемы, связанную с уменьшением диаметров трубопроводов, циклона и сепаратора.

Отметим, что в вариантах 1 и 2 запас по температуре сушильного агента по условию конденсации водяных паров в конце установки не превышает 22°C .

Динамические возмущения, изменения скорости аэросмеси и расхода воздуха через мельницу приводят к перераспределению концентрации пыли в тракте, взвихриванию тлеющих отложений и усилению контакта этих отложений с объемом взрывоопасной смеси. В таких условиях даже при поддержании нормативной температуры аэросмеси в пределах 70°C при воздушной сушке высокорекреакционного каменного угля не гарантирована взрывобезопасная эксплуатация пылесистемы. Уменьшение температуры аэросмеси ниже 70°C приводит к отложению влажной пыли по тракту пылеприготовления.

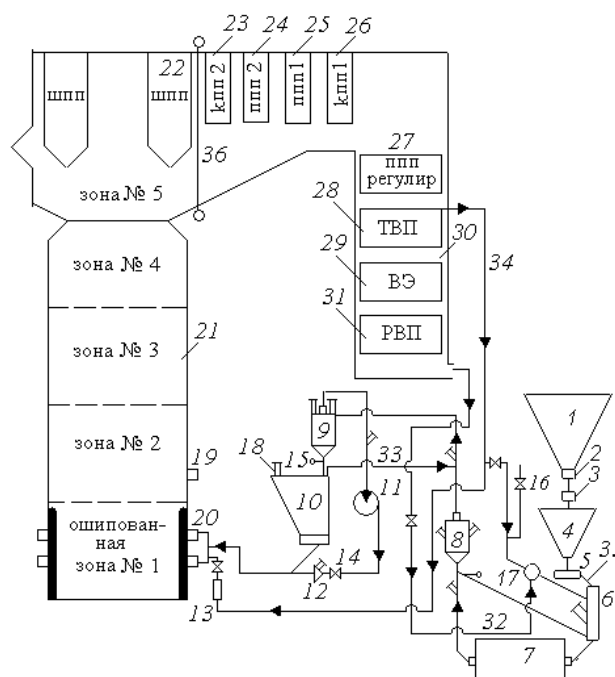


Рис. 2. Схема реконструкции индивидуальной системы пылеприготовления котлоагрегата ТП-100 с промежуточным бункером пыли и шаровой барабанной мельницей ШБМ-50 и газовой сушилкой обогащенного каменного угля марки Г: обозначения 1 – 31 те же, что на рис. 1; 32 – трубопровод дымовых газов; 33 – трубопровод влагоотсоса; 34 – трубопровод горячего воздуха; 35 – течка сырого угля; 36 – подвесные трубы (фестон).

Анализ работы системы пылеприготовления и парогенератора ТП-100 при газовой сушке каменного угля (рис. 2). При газовой сушке каменного угля ГСШ температура отработанного сушильного агента не должна превышать 120°C , а содержание кислорода в газовой смеси (по объему) – не более 16% [3, 4]. При работе котлоагрегата на нагрузке 200 МВт сушильный агент на входе в пылесистему состо-

ит из 48% горячего воздуха, отобранного после трубчатого воздухоподогревателя с температурой 388°C, поз. 34, 13,4% холодного воздуха, поз. 16 и 38,6% рециркулирующих дымовых газов, отработанных после регенеративного вращающегося воздухоподогревателя с температурой 130°C, поз. 32 (таблица 1, вариант 3). Транспортирующим агентом пыли к основным горелкам является отработанный запыленный сушильный агент с температурой 90°C. При такой организации процесса сушки каменного угля температура на выходе из зоны максимальных тепловыделений составляет 1604°C, а жидкого шлака – 1443°C, т.е. нет запаса по температуре жидкого шлака, необходимого для организации устойчивого режима жидкого шлакоудаления на более низких нагрузках. Для создания этого запаса поднимем температуру отработанного сушильного агента до 120°C, благодаря чему температура сушильного агента на входе в нисходящую сушилку возрастет с 240°C до 307,9°C из-за уменьшения расхода холодного воздуха до 1% (таблица 1, ср. варианты 3 и 4). В результате коэффициент избытка воздуха в основных горелках снижается с 1,116 до 1,073, а температура жидкого шлака повышается всего лишь до 1475°C. Результаты расчетов показывают, что полученный таким образом запас по температуре жидкого шлака 25°C не позволяет обеспечить устойчивое жидкое шлакоудаление даже на нагрузке 140 МВт.

При этом в варианте 4 содержание кислорода в газовой смеси (по объему), в отличие от варианта 3, превышает 16%.

Из таблицы 1 видно, что запас по температуре сушильного агента по условию конденсации водяных паров в конце установки в варианте 4 оказывается на 31,5°C выше, чем в варианте 3 за счет более высокой температуры отработанного сушильного агента.

Анализ работы системы пылеприготовления и парогенератора ТП-100 при газовой сушке каменного угля (рис. 3). При газовой сушке каменного угля ГСШ температура отработанного сушильного агента и концентрация окислителя в газе (по объему) не должны превышать, соответственно 120°C и 16% [3, 4].

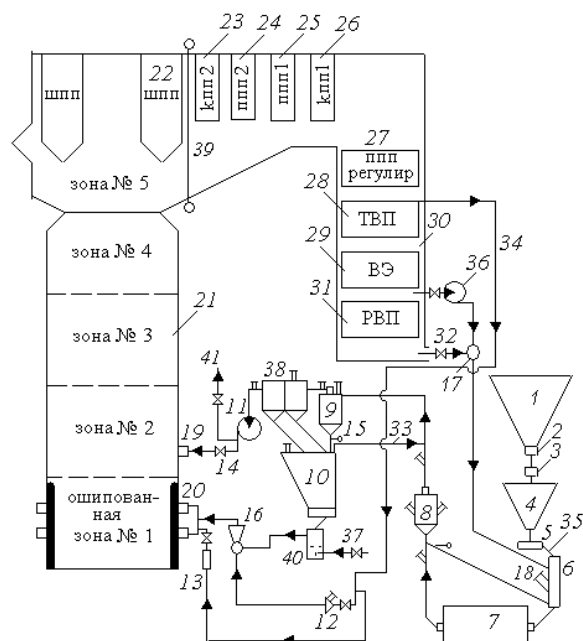


Рис. 3. Схема реконструкции индивидуальной системы пылеприготовления котлоагрегата ТП-100 с промежуточным бункером пыли и шаровой барабанной мельницей ШБМ-50 и газовой сушилкой обогащенного каменного угля марки Г: обозначения 1 – 15, 17 – 31, 33 – 35 те же, что на рис. 1; 16 – эжектор; 32 – газопровод; 36 – дымосос рециркуляции газов (ДРГ); 37 – оживляющий агент; 38 – рукавный циклонный фильтр (или батарейные циклоны БЦП-500); 39 – подвесные трубы (фестон); 40 – аэрационный питатель; 41 – трубопровод сброса сушильного агента в газопровод за котлом; 42 – клапан присадки холодного воздуха.

В отличие от предыдущих схем реконструкции пылесистемы, которые не обеспечивают в полной мере ее взрывобезопасность и устойчивое жидкое шлакоудаление в диапазоне изменения нагрузки парогенератора от 120-200 МВт, здесь внесены следующие изменения, позволяющие решить поставленные выше задачи. Данная концепция реконструкции схемы пылеприготовления базируется на шести основных принципах:

1. Не использовать тепловую энергию горячего воздуха для сушки каменного угля ГСШ. Вся энергия тратится исключительно на горение.
2. В ошипованную зону подавать сухое топливо, у которого низшая теплота сгорания Q_n^c выше, чем величина Q_n^p сырого угля.
3. Минимизировать попадание инертных дымовых газов в зону максимальных тепловыделений, чтобы исключить возможность уменьшения адиабатической температуры горения и концентрации окислителя, а, следовательно, не допустить снижения эффективности выгорания

кокса. Для этого отработанный сушильный агент (дымовые газы) вводится в сбросные горелки, поз. 19, которые расположены над ошипованной зоной и не оказывают на нее влияния. Кроме того, предусмотрена подача высококонцентрированной пыли в основные горелки аэрационным питателем, поз. 40 в соотношении 80-100 кг пыли на кг транспортирующего агента.

4. Обеспечить высокую степень очистки отработанного сушильного агента от пыли, тем самым уменьшить мехнедожог и повысить температуры в ошипованной зоне и жидкого шлака. Для этого за циклоном, поз. 9 устанавливается новое устройство – рукавный циклонный фильтр (или батарейные циклоны типа БЦП-500), обеспечивающее тонкую очистку до 99%, поз. 38.

5. Высокий уровень взрывобезопасности пылесистемы достигается за счет сушки каменного угля ГСШ дымовыми газами, у которых концентрация окислителя (по объему) не превышает 10%.

6. Обеспечить в широком диапазоне регулирование расхода и температуры сушильного агента на входе в пылесистему. Для этого отборы дымовых газов производятся после водяного экономайзера, поз. 36 и регенеративного вращающегося воздухоподогревателя, поз. 32.

При работе парогенератора ТП-100 на нагрузке 200 МВт сушильный агент на входе в пылесистему формируется из 51% дымовых газов, отобранных после водяного экономайзера с температурой 325°C с помощью вновь установленного устройства ДРГ, поз. 36 и 49% дымовых газов, отобранных после регенеративного вращающегося воздухоподогревателя с температурой 147,6°C, поз. 32 (таблица 1, вариант 5). При этом температура отработанного сушильного агента принималась 90°C. После смешения двух потоков газа, поз. 17 температура сушильного агента на входе в нисходящую сушилку составила 240°C, поз. 6, а в мельницу – 135°C, поз. 7. При такой схеме организации процесса сушки угля температура на выходе из торкретированной зоны оказывается значительно выше, чем в вариантах 1-4 и составляет 1735°C, а температура жидкого шлака превышает температуру нормального жидкого шлакоудаления на 113°C, благодаря чему обеспечивается устойчивый режим

жидкого шлакоудаления в диапазоне изменения нагрузки парогенератора от 120-200 МВт.

Необходимо отметить, что рециркуляция дымовых газов благотворно влияет на регулирование температуры вторичного пара. Для более тонкой регулировки здесь предусмотрен сброс сушильного агента в газоход за котлом перед золоуловителями, поз. 41.

Основные трудности, возникающие при организации процесса сушки ГСШ на нагрузках котлоагрегата 120 МВт и 140 МВт связаны, прежде всего, с определением оптимальных расходов сушильного агента на входе в систему пылеприготовления, которые обеспечивали бы скорости газа в пылепроводах, лежащие в требуемых интервалах, выбранных из условия невыпадения пыли на стенки трубопроводов. Для этого на обоих режимах повысим температуру отработанного сушильного агента с 90°C до 120°C (таблица 1, варианты 6 и 7). В результате расходы и температуры сушильного агента на входе в пылесистему на нагрузке 120 МВт соответственно равны 107591 м³/ч и 257,3°C, а на 140 МВт – 105393 м³/ч и 279,5°C. В ошипованной зоне на нагрузке 140 МВт температура жидкого шлака превышает температуру нормального жидкого шлакоудаления на 36°C, что гарантирует устойчивый режим жидкого шлакоудаления. На нагрузке 120 МВт обеспечивается режим устойчивого шлакоудаления за счет температуры шлака 1439°C, но без всякого запаса по температуре жидкого шлакоудаления.

Из таблицы видно, что коэффициенты избытка воздуха в горелках на нагрузках парогенератора 120 и 140 МВт несколько занижены и составляют соответственно 1,03 и 1,01. Оптимальные значения рассматриваемых коэффициентов в горелочных устройствах на указанных нагрузках составляют 1,05. Численные исследования процесса горения ГСШ показывают, что с повышением значения коэффициента избытка воздуха с 1,01 до 1,05 при помощи клапана присадки холодного воздуха (рис. 3, поз. 42), запас по температуре жидкого шлака снижается с 36°C до 23°C, а возрастание величины коэффициента избытка воздуха с 1,03 до 1,05 приводит к незначительному (на 6°C) уменьшению температуры

жидкого шлака. В обоих случаях сохраняется режим устойчивого шлакоудаления на нагрузках парогенератора 120 и 140 МВт.

Нулевой запас по температуре жидкого шлака на нагрузке парогенератора 120 МВт говорит о невозможности организации устойчивого режима работы котлоагрегата на нагрузке 100 МВт. Как показывают расчеты, температура шлака в рассматриваемом режиме оказывается на 10°C ниже температуры жидкоплавкого состояния золы при избытке воздуха на выходе из топки 1,4 (таблица 1, вариант 8). С уменьшением

избытка воздуха до 1,25 температура шлака превышает температуру жидкоплавкого состояния золы на 37°C. Но этого явно недостаточно для устойчивого жидкого шлакоудаления. Одно из основных условий построения такого режима: величина коэффициента избытка воздуха на выходе из топки не должна превышать 1,2, вследствие чего температура на выходе из зоны максимальных тепловыделений возрастает до 1570°C. Такого режима можно достичь за счет сброса отработанного запыленного сушильного агента в газоход за котлом (рис. 3, поз. 41).

Таблица 1. Результаты расчетов парогенератора ТП-100 и системы пылеприготовления

Наименование величин	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Характеристики котлоагрегата								
Марка угля	ГСШ	ГСШ	ГСШ	ГСШ	ГСШ	ГСШ	ГСШ	ГСШ
Температура нормального жидкого шлакоудаления, °С	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Расход питательной воды, кг/ч	670000	670000	670000	670000	670000	470000	402000	335000
Расход вторичного пара, кг/ч	590000	590000	590000	590000	590000	415000	354000	295000
Нагрузка котла, %	100	100	100	100	100	70	60	50
Полный расход топлива на котел, кг/ч	85453	85244	85184	85476	86888	63470	54490	45172
Состав сушильного агента на входе в пылесистему	воздух	воздух	газ, воздух	газ, воздух	дымовые газы	дымовые газы	дымовые газы	дымовые газы
Место подачи рециркулирующих газов в котел	–	–	в зону № 1	в зону № 1	в зону № 2	в зону № 2	в зону № 2	в зону № 2
Место отбора рециркулирующих газов в котле	–	–	после РВП	после РВП	после РВП и после ЭК	после РВП и после ЭК	после РВП и после ЭК	после РВП и после ЭК
Температура газов на выходе из зоны №1, °С	1651	1686	1604	1639	1735	1653	1602	1492
Температура газов в нижней части зоны №1, °С	1654	1688	1607,4	1642	1740	1655,8	1603	1495
Средняя температура загрязненных экранов зоны №1, °С	1485	1516	1443	1475	1563	1486	1439	1340
Температура загрязненных экранов зоны №1 в районе пода, °С	1488	1519	1446	1478	1566	1489	1442	1343
Температура газов на выходе из топки, °С	1182	1173	1184	1180	1104	991	927,5	915
Температура газов на выходе из ШПП, °С	1025	1011	1034	1024	985	908	858,75	853
Температура газов на выходе из фестона, °С	1012	996	1021	1010	974	897	849	843

Наименование величин	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура газов на выходе из КПП2, °С	869	855	880	868	856	790	756	746
Температура газов на выходе из ППП2, °С	788	774	798	787,3	784	727	700	688
Температура газов на выходе из ППП1, °С	603	596	608	603	610	569	555	542
Температура газов на выходе из КПП1, °С	489	486	493	489	499	469	460	449
Температура газов на выходе из регулировочной ступени ППП, °С	473	465	480	474	486	455	447	435
Температура газов на выходе из ТВП, °С	375	369	386	380	407,6	381	375,8	356
Температура газов на выходе из экономайзера, °С	290	286	298	293	325	306	300	284
Температура газов на выходе из горячей части РВП, °С	152	150	162	158	183	167	167,5	153
Температура газов на выходе из холодной части РВП (уходящие газы), °С	122	120	130	127	147,6	132,8	133	121
Температура холодного воздуха на входе в холодную часть РВП, °С	30	30	30	30	30	30	30	30
Температура горячего воздуха на входе в ТВП, °С	241	239	251	247,04	280	264,6	263	246
Температура горячего воздуха на выходе из ТВП, °С	376	372	388	383	410	391	388	371,5
Минимальная температура стенки в горячей части РВП, °С	121	120	130	126	148	135	136,4	125
Минимальная температура стенки в холодной части РВП, °С	86	84,6	91	89	103	93,5	93,6	86,3
Температура точки росы, °С	110,6	111,6	110,6	111,2	110,3	110,1	109,1	108,1
Характеристики пылесистемы								
Тонина помола, R ₉₀	28	28	28	28	28	28	28	28
Коэффициент размолоспособности	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Температура отработанного сушильного агента, °С	70	70	90	120	90	120	120	100
Температура угля перед нисходящей сушкой, °С	0	0	0	0	0	0	0	0
Относительная влажность отработанного сушильного агента	23	37	35	21	45	32	31	31
Температура точки росы в пылесистеме, °С	43	47	63,5	62	70,8	70,8	70,8	70,8
Производительность мельницы ШБМ, т/ч	47	46,88	47,08	47	47,8	34,9	29,96	24,85
Количество испаренной влаги	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Количество сушильного агента на один кг сырого угля на входе в пылесистему, кг/кг	1,979	1,2881	1,86	1,714	1,86	2,1	2,515	1,718

Наименование величин	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура сушильного агента на входе в пылесистему, °С	201	266	240	307,9	240	279,5	257,3	276,2
Доля горячего воздуха от количества сушильного агента на входе в пылесистему	0,45	0,64	0,48	0,71	–	–	–	–
Доля газов, отобранных после РВП, от количества сушильного агента на входе в пылесистему	–	–	0,386	0,28	0,49	0,185	0,28	0,08
Доля холодного воздуха от количества сушильного агента на входе в пылесистему	0,25	0,06	0,134	0,01	–	–	–	–
Доля рециркулирующего отработанного сушильного агента от количества сушильного агента на входе в пылесистему	0,3	0,3	–	–	–	–	–	–
Доля газов, отобранных после ЭЖ, от количества сушильного агента на входе в пылесистему	–	–	–	–	0,51	0,815	0,72	0,92
Количество влажного сушильного агента в конце пылесистемы, кг/кг	2,554	1,689	2,4	2,22	2,4	2,71	3,22	2,2
Расход влажного сушильного агента в конце пылесистемы, м ³ /ч	118769	79314	118227	118354	118915	105393	107591	58918,5
Содержание кислорода во влажном сушильном агенте в конце пылесистемы	> 0,16	> 0,16	0,15894	0,16792	0,0893	0,08586	0,0941	0,09542
Коэффициент избытка воздуха в горелке, кг/кг	1,12	1,05	1,116	1,073	1,03	1,01	1,03	1,165
Доля газов, отобранных после РВП, от количества газов после места отбора	–	–	0,0532	0,03704	0,0664	0,02796	0,0483	0,00881
Доля газов, отобранных после ЭЖ, от количества газов после места отбора	–	–	–	–	0,0731	0,1354	0,13299	0,114
Количество влаги, снятой в нисходящей сушилке, т/ч	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,114	0,956	0,793
Температура сушильного агента на выходе из нисходящей сушилки, °С	102	114,8	137,5	193	135	182,9	176	160,9
Весовое количество сушильного агента в нисходящей сушилке, кг/кг	2,085	1,36	1,96	1,81	1,965	2,212	2,64	1,814
Расход сушильного агента через нисходящую сушилку, м ³ /ч	119080	85691	121348	126885	121580	109112	108639	62356
Влагосодержание отработанного сушильного агента на выходе из пылесистемы, г/кг	51	77	192,5	173,85	299	301,8	296	294
Минимально допустимая температура сушильного агента по условиям конденсации водяных паров, °С	48	51	68,5	67	75,8	75,8	75,8	75,8
Запас по температуре сушильного агента в конце установки, °С	22	19	21,5	53	14,2	44,2	44,2	24,2

Примечание. При позонном расчете высота точки разбивается на пять зон. Высота первой ошипованной зоны – 9,70 м, второй – 3,6 м, третьей – 3,6 м, четвертой – 4,53 м, пятой – 9,266 м.

Выводы. 1. При воздушной сушке каменно-го угля диапазон регулирования нагрузки котлоагрегата ТП-100 (140-200 МВт) оказывается ниже запланированного 120-200 МВт. При этом не удается достичь ни высокого уровня взрывобезопасности пылесистемы, ни запаса по температуре сушильного агента по условию конденсации водяных паров ($\leq 22^\circ\text{C}$).

2. Диапазон регулирования нагрузки парогенератора ТП-100 при использовании схемы газовой воздушной сушки ГСШ значительно уже по сравнению с воздушной сушкой. Это связано со сбросом забалластированного инертными газами отработанного сушильного агента в основные горелки, что приводит к уменьшению температур газов на выходе из ошипованной зоны с 1688°C до 1642°C и шлака с 1516°C до 1475°C , снижению концентрации окислителя в газе и эффективности выгорания угля (таблица 1, ср. варианты 2 и 4). Уровень взрывобезопасности системы пылеприготовления (O_2 (по объему) $< 16\%$) и запас по температуре сушильного агента по условию конденсации водяных паров ($\leq 53^\circ\text{C}$) при газозвушной сушке оказывается выше, чем при воздушной.

3. При использовании в качестве сушильного агента дымовых газов удается достичь запланированного интервала регулирования нагрузки котлоагрегата ТП-100 120-200 МВт путем следующих технических решений: 1) тепловая энергия воздуха не расходуется на испарение влаги сырого угля; 2) в зону максимальных тепловыделений подается сухой уголь ($Q_n^c > Q_n^p$) и минимизируется поступление в нее инертных дымовых газов; 3) обеспечивается высокая степень очистки от пыли отработанного сушильного агента. Высокий уровень взрывобезопасности пылесистемы достигается низким содержанием кислорода в сушильном агенте ($\text{O}_2 < 10\%$). При такой организации процесса сушки ГСШ на нагрузке 200 МВт удается достичь высоких значений температур на выходе из ошипованной зоны 1735°C и шлака 1563°C , в результате чего температура жидкого шлака превышает температуру нормального жидкого шлакоудаления на 113°C , что значительно выше, чем при воздушной и газозвушной сушках. Существенный запас по

температуре жидкого шлака 36°C присутствует при разгрузке парогенератора до 140 МВт, что свидетельствует об устойчивом жидком шлакоудалении. На нагрузке 120 МВт указанный запас исчезает, однако температура шлака 1439°C позволяет организовать устойчивый режим шлакоудаления. Кроме того, при низких нагрузках сохраняется достаточно большой запас по температуре сушильного агента по условию конденсации водяных паров $44,2^\circ\text{C}$.

1. Кузнецов Н.В., Митор В.В. и др. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

2. Соколов Н.В., Кисельгоф М.Л. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов (Нормативные материалы) – Л.: ОНТИ ЦКТИ, 1971. – 313 с.

3. Инструкция по обеспечению взрывобезопасности топливоподач и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива (СО 153-34.03.352-2003) № 251, 2003 г. – 19 с.

4. Правила технічної експлуатації електричних станцій і мереж № 296 (ГКД 34.20.507-2003), 2003. – 477 с.

REFERENCES

1. Kuznetsov N.V., Mitor V.V. et al. Thermal calculation of boiler units (Normative method) – M.: Energia, 1973. – 296 p.

2. Sokolov NV, Kiselgoff M.L. Calculation and design of pulverizing units of boilers (Normative materials) – L.: ONTI SKTI, 1971. – 313 p.

3. Instruction for explosion safety of fuel supply and units for the preparation and combustion of pulverized fuel (CO 153-34.03.352-2003) No. 251, 2003. – 19 p.

4. The rules of technical operation of electric power stations and networks № 296 (ГКД 34.20.507-2003), 2003. – 477 p.

Б.Б.Рохман, докт.техн.наук (Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ)

Числовий аналіз різних схем реконструкції існуючої системи пилоприготування при переведенні парогенератора ТП-100 з АШ на газове кам'яне вугілля

Проаналізовано три варіанти реконструкції системи пилоприготування котлоагрегату ТП-100 для спалювання ГСШ щодо вибухобезпеки пилосистеми і діапазону регулювання навантаження парогенератора. Ці схеми розрізняються між собою способом сушіння вугілля. Показано, що повітряне сушіння не забезпечує досить високий рівень вибухобезпеки пилосистеми навіть при підтримці нормативної температури аеросуміші в межах 70°C , а також не дозволяє знижувати навантаження нижче 140 МВт. При газоповітряному сушінні вміст O_2 (за об'ємом) $< 16\%$, що істотно впливає на температурний рівень у шипованій зоні і призво-

дить до значного звуження діапазону регулювання парогенератора в порівнянні з повітряним. Показано, що найбільш ефективною схемою є сушка вугілля димовими газами зі скиданням сушильного агента в охолоджену зону. Ця схема дозволяє значно розширити діапазон регулювання навантаження парогенератора зі 120 до 200 МВт при вмісті в димових газах $O_2 < 10\%$, що забезпечує високий рівень вибухобезпеки. Бібл. 4, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: парогенератор, сушка, система пилоприготування, вугілля, заштована зона, сушильний агент, шлак, пальник.

Rokhman B., Doctor of Technical Sciences (Coal Energy Technology Institute NAS of Ukraine, Kyiv)

Numerical analysis of various schemes for reconstructing the existing dust preparation system when changing the TP-100 steam generator operation from burning anthracite culm to burning gas coal

Three variants of the dust preparation system reconstruction for the TP-100 boiler unit for burning gas coal in respect to the explosion safety of the dust system and the load regulation range of the steam generator are analyzed. These schemes differ by the method of drying coal. It is shown that air drying does not provide a sufficiently high level of explosion protection of the dust system, even if the temperature of the air mixture is maintained within normative 70°C , and also does not allow reducing the load below 140 MW. In gas-air drying, O_2 content (by volume) is $< 16\%$, which has a significant effect on the temperature level in the studded zone and leads to a significant limitation of the steam generator control range in comparison with the air drying. It has been shown that the most effective method is to dry the coal with flue gases and discharge the drying agent into the cooled zone. This method allows to significantly expand the range of load regulation of the steam generator from 120 to 200 MW with the content $O_2 < 10\%$ in flue gases, which ensures a high level of explosion safety. References 4, table 1, figures 3.

Keywords: steam generator, drying, dust preparation system, coal, studded zone, drying agent, slag, burner.

SYNOPSIS

Three schemes for reconstructing the dust preparation system for the boiler unit TP-100 for burning gas coal with respect to the explosion safety of the dust system and the stability of the liquid slag leakage from the tap of the combustion chamber of the steam generator at a wide load regulation range of 120-200 MW are studied. These schemes differ by the way of drying solid fuel. It is shown that at air drying of coal it is not possible to achieve a high level of explosion safety of the dust system even when the standard temperature of the air mixture is within 70°C , nor the unloading of the block below 140 MW, which is less than the planned range of 120-200 MW, nor a large margin for drying agent temperature by the condition of condensation of water vapor. The interval of the boiler load changing of the unit TP-100 using the gas-air drying scheme for coal is considerably narrower than in the case of air drying. This is due to a decrease in gas temperatures at the outlet from the zone of maximum heat release and liquid slag, O_2 concentration in the gas, and the burn-out efficiency of solid fuel due to the discharge of spent drying agent loading with inert gases into the main burners. However, the degree of explosion safety of the dust system (O_2 (by volume) $< 16\%$) and the temperature margin of the drying agent by the condition of water vapor condensation at air-gas drying is higher than that of air one. Of the three proposed options for reconstructing the dust preparation system of the boiler unit TP-100, the most efficient is the scheme for drying coal with flue gases and discharging the drying agent into the cooled zone. This scheme allows to organize a regime of stable liquid slag removal within the planned interval of load regulation of the boiler unit TP-100 of 120-200 MW due to the following measures: a) the thermal energy of the air is not consumed to evaporate the moisture of the raw coal; b) dry coal is fed to the zone of maximum heat release and inert gases are introduced into it; c) a high degree purification from the dust in the spent drying agent is provided. A high level of explosion safety of the dust system is achieved by a low oxygen content in the drying agent ($O_2 < 10\%$). The proposed measures allow exceeding the temperature of liquid slag above the temperature of normal liquid ash removal at 113°C , which is much higher than at air and gas-air drying. This margin provides stable liquid slag removal when unloading the steam generator to 120 MW.

Стаття надійшла до редакції 30.03.17

Остаточна версія 31.05.17