



ПОВЫШЕНИЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПЫЛЕПРИГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ТЭС

К.т.н., доц. Лейкин В.З.¹ (Петербургский энергетический институт повышения квалификации)

АННОТАЦИЯ. Представлены современные методы и оборудование обеспечения взрывобезопасной эксплуатации систем пылеприготовления котельных установок. Рассмотрены основные факторы, влияющие на возникновение и распространение взрыва пыли и их учёт при проектировании и эксплуатации. Представлен опыт повышения взрывобезопасности пылесистем на отечественных ТЭС. Показаны основные направления повышения взрывобезопасности на основе новых разработок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: взрывобезопасность, системы пылеприготовления, методы, оборудование, направления повышения взрывобезопасности.

Важнейшим направлением обеспечения надёжной эксплуатации угольных ТЭС как в России, так и за рубежом является проблема повышения её взрывобезопасности. Практически все энергетические топлива (за исключением антрацитов и некоторых видов каменных углей) в пылевидном состоянии в смеси с воздухом образуют взрывоопасную смесь, которая при наличии источника воспламенения может взорваться в системе пылеприготовления [1]. Кроме источника воспламенения, для возникновения взрыва необходимо наличие ряда факторов режимного и конструктивного характера: взрывоопасной концентрации пыли, достаточного содержания в ней мелкодисперсных частиц (менее 150 мк) и фракций с низкой влажностью, достаточного содержания кислорода, уровня температуры сушильно-транспортующих газов и т. д. Большинство находящихся в эксплуатации сушильно-размольных установок ТЭС работают в условиях концентраций пыли, близких к оптимальной для возникновения взрыва, и при наличии различного сочетания других факторов, способствующих его возникновению. Поэтому, несмотря на жесткую регламентацию нормативами и правилами, направленными на повышение взрывобезопасности пылесистем как на стадии проектирования, так и эксплуатации взрывы топливной пыли в системах пылеприготовления — достаточно частое явление. Некоторые из них приводили к тяжелым последствиям: травматизму людей, в том числе со смертельным исходом, крупномасштабному разрушению оборудования, остановке котлоагрегатов и даже всей ТЭС. В основном указанные случаи были связаны либо с нарушениями правил эксплуатации, либо с нештатными ситуациями, например, при поступлении топлива, значительно отличающегося по свойствам от привычного для работы персонала ТЭС, и регламентированного в режимной карте. В настоящее время в российской энергетике при-

меняются два основных метода взрывозащиты [2, 3]:

- установка на оборудовании устройств, обеспечивающих снижение давления взрыва пыли путем отвода части газов через выхлопные отверстия, раскрывающиеся при повышении внутреннего давления (выше определённого уровня) — взрывные предохранительные клапаны;
- изготовление всего оборудования, работающего с взрывоопасной средой, с расчетом прочности его корпусов на максимально возможное давление взрыва.

В России до последнего времени как наименее затратный применялся способ с использованием взрывных клапанов, который является наиболее опасным для обслуживающего персонала, т. к. при его применении имеется возможность поражения людей раскаленными газопылевыми выбросами. Опыт эксплуатации пылеприготовительных установок показал, что упрочнение оборудования на максимально возможное давление взрыва топливной пыли является сравнительно малозатратным мероприятием, и позволяет исключить размещение взрывных клапанов в зонах обслуживания оборудования. Пылевой взрыв — это не детонация с образованием ударных волн, а очень быстрое горение газообразных летучих топлив, при котором огромная поверхность частиц (до 1000 м²/кг) обуславливает практически мгновенное (<0,1 с) протекание процесса, резкое увеличение температуры и, следовательно, объема среды, что приводит к интенсивному росту давления смеси. При локальном взрыве пылевзвеси в потоке от образовавшегося фронта пламени за счет конвекции, излучения, турбулентной диффузии и т. д. осуществляется передача тепла к «холодной» смеси, в результате чего происходит ее воспламенение и, следовательно, распространение волны давления по объему пылесистемы. Длительный опыт эксплуатации и исследования показывают, что максимальное давление взрыва в промышленных пылесистемах составляет не

¹ 196135, г. Санкт-Петербург, ул. Авиационная, 23

более 0,25–0,35 МПа, скорость распространения взрыва не превышает 200 м/с и явление детонации (с образованием ударных волн) в них не наблюдается.

В России проведены уникальные исследования условий возникновения и протекания взрывов пыли на промышленных пылесистемах при упрочнении оборудования и исключении взрывных клапанов, которые подтвердили, что как в схемах прямого вдувания, так в схемах с промбункером давление взрыва не превысило 0,32 МПа [4, 5]. На рис. 1в представлены индикаторные диаграммы изменения давления взрыва по тракту при взрыве в пылесистеме с ШБМ с бункером пыли, при исключении взрывных клапанов из зоны обслуживания, но с сохранением их в безопасной зоне (на циклонах и сепараторах, размещённых на крыше) [5]. Давление взрыва по тракту пылесистемы в этих условиях не превысило 0,2 Мпа.

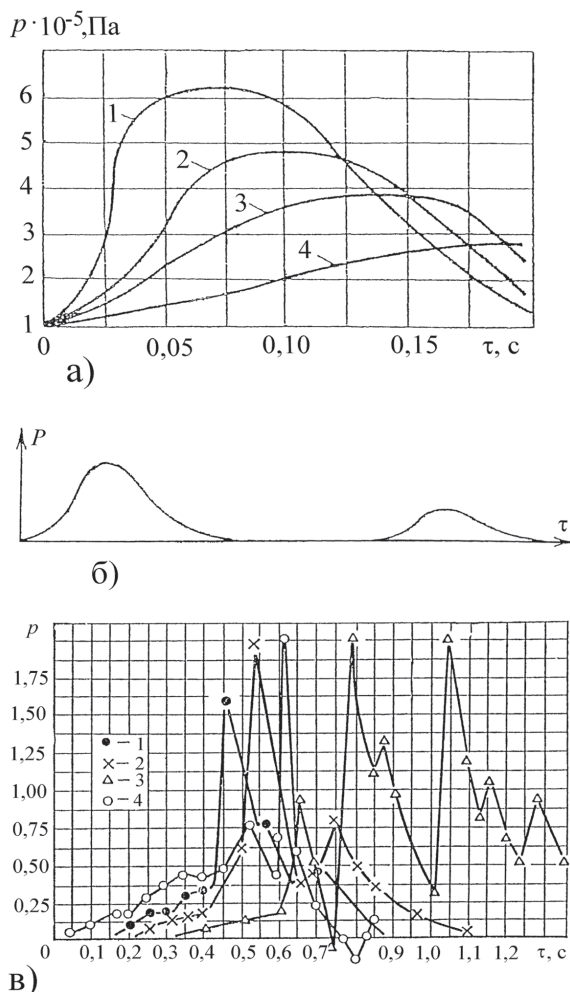


Рис. 1. Типовые индикаторные диаграммы развития взрыва: а) в лабораторной установках различного объёма V ($V_1 < V_2 < V_3 < V_4$); б) в стендовой установке с возникновением повторных взрывов; в) в промышленной пылесистеме с ШБМ (при сохранении и раскрывании взрывных клапанов на сепараторе и циклоне). P – измеренное давление при взрыве кг/см^2 ; τ – время развития взрыва, с. 1 – в ПСУ; 2 – в сепараторе; 3 – в циклоне; 4 – выходная горловина ШБМ (место установки воспламенителя пыли).

Оборудование пылесистем новых энергоблоков в настоящее время (по заявке заказчика) поставляется ОАО «Тяжмаш», ОАО «НПО ЦКТИ» в прочном корпусе, рассчитанном на внутреннее избыточное давление 0,35 МПа и без взрывных клапанов. Необходимо отметить, что на ряде действующих ТЭС, несмотря на затраты, с целью защиты персонала проведена реконструкция пылесистем с упрочнением находящегося в эксплуатации оборудования на 0,35 МПа с ликвидацией взрывных клапанов (Гусиноозерская ГРЭС и др.). Указанная реконструкция сводится в основном к дополнительному оребрению элементов пылесистем, замены плоских стенок цилиндрическими и т. д. Очень важно при выполнении такой реконструкции следить за местами интенсивного износа и незамедлительно восстанавливать проектную величину толщин стенок оборудования в соответствии с инструкцией по его эксплуатации. Наибольшие затраты на упрочнение требуются при оребрении плоских стенок молотковых мельниц, инерционных сепараторов, раздающих коробов мельничных вентиляторов, коробов подвода воздуха к мельницам. Промышленные эксперименты и опыт эксплуатации показывают, что при взрыве в тракте пылесистемы давление передается также в тракт подвода сушильного агента, были случаи разрушения коробов подачи горячего воздуха в мельницы и установленных на нем регулирующих клапанов. Границу воздействия взрыва в этом тракте определить в настоящее время расчетным путем невозможно, поэтому в [3] принято, что должен быть упрочнен участок газозухопровода от мельницы до напорного распределительного короба сушильного агента или до индивидуального вентилятора сушильного агента. Результаты испытаний по проведению взрывов в пылесистеме с промбункером при удалении взрывных клапанов из помещения котельного цеха и сохранении их на крыше здания позволяют рекомендовать величину упрочнения пылеприготовительного оборудования при такой реконструкции не более, чем на 0,25 МПа, что существенно снижает затраты на повышение взрывобезопасности установки.

При воспламенении в потоке основную роль играют газифицированные летучие топлива, выделение которых происходит при высокой температуре (топлива, имеющие $V_f < 10\%$ практически не взрываются); выделившиеся летучие могут возгораться от источника воспламенения достаточной мощности. В подавляющем большинстве случаев таким источником являются взвихренные тлеющие раскаленные отложения пыли. Слой отложений может окисляться с выделением тепла и воспламеняться (через определенный период времени индукции) при обтекании его потоком с низкой температурой ($\approx 100^\circ\text{C}$) и низким содержанием кислорода. Поэтому важнейшим мероприятием при проек-

тировании и эксплуатации пылесистем является исключение пылевых отложений в пылепроводах и оборудовании. Контроль и ликвидация отложений регламентируются местной инструкцией на основе правил взрывобезопасности.

Как уже указывалось выше, вероятность возникновения и интенсивность взрыва при эксплуатации, кроме свойств топлива, определяются рядом режимных факторов. Поэтому однозначно классифицировать топлива по взрывоопасности, исходя только из их физико-технологических характеристик (содержания и теплоты сгорания летучих, содержания углерода, водорода, влаги, зольности и т. д.), вообще говоря, представляется неправомерным. В то же время экспериментальные и теоретические исследования влияния свойств топлива на характеристики их взрываемости несомненно являются важнейшими для понимания процессов возникновения и протекания взрывов пылевзвеси, качественной оценки вероятности взрывов при эксплуатации пылесистем и разработки мероприятий по контролю за взрывобезопасной эксплуатацией и взрывозащите. Рядом организаций (ОАО «НПО ЦКТИ», ОАО «ВТИ», ОАО «ОРГРЭС», ОАО «Сибтехэнерго», ОАО «Иркутскэнерго» и др.) предложены различные критерии взрываемости топлива. Например, в работе ЦКТИ [1] представлено подробное исследование взрываемости большого количества топлив – от древесной пыли и торфа, до тощих углей и антрацита на лабораторной установке. Важным результатом этой работы явилось получение экспериментальной зависимости максимального давления взрыва от величины β_A , характеризующей отношение свободного водорода к углероду в летучих (рис. 2):

$$\beta_A = 2,37 [H^{daf} - O^{daf}/8]/C_A,$$

где H^{daf} , O^{daf} – содержание водорода и кислорода в горючей массе топлива, C_A – содержание углерода в летучей части топлива ($C_A = V^{daf} - H^{daf} - O^{daf} - N^{daf} - S^{daf}$). Интересно отметить, что чем больше углерода в летучих и меньше водо-

рода, тем интенсивнее протекает взрыв пыли, т.е. наиболее опасными являются высокомолекулярные соединения (смолы, кислоты).

В настоящее время в действующих правилах [2, 3] для классификации углей по их взрывоопасности используется критерий K_T , представляющий собой отношение концентрации летучих в сухой массе топлива к нижнему концентрационному пределу распространения пламени горючих компонентов летучих веществ в присутствии балласта – золы и кокса:

$$K_T = \frac{V^d}{\mu_{л.б.}^H},$$

причем величины V^d и $\mu_{л.б.}^H$ вычисляются по данным элементарного состава топлива. По величине этого критерия все топлива достаточно произвольно разбиты на четыре группы взрываемости, для которых предусмотрены различные мероприятия по обеспечению взрывобезопасности. Однако эта градация весьма условна, т. к. например, для одного и того же угля изменение величины K_T на 1–2% (например, из-за незначительного увеличения зольности негорючая часть ведет себя как инертная добавка, поглощающая тепло) может перевести топливо из разряда взрывоопасных в разряд невзрывоопасных, хотя характеристики его взрываемости практически не изменятся. С другой стороны, например, для ирша-бородинского угля $K_T = 3,22$, для черемховского угля $K_T = 2,32$; в то же время интенсивность взрыва в пылесистеме, полученная в промышленных экспериментах [4] для этих топлив, практически была одинаковой, что свидетельствует о решающем влиянии на процесс взрыва режимных параметров (влажности пыли, температуры за мельницей и т. д.).

Основным параметром при эксплуатации, который должен контролироваться и регулироваться является температура пылегазовой смеси t_c за мельницей (сепаратором), т. к. при прочих равных условиях её величина оказывает решающее влияние на вероятность возникновения и интенсивность взрыва топливной пыли. Это обусловлено тем, что температура азросмеси определяющим образом влияет на величину влажности пыли, т.к. процесс сушки топлива практически полностью заканчивается в мельнице. При этом правилами [2, 3] регламентируется только верхний предел t_c , который в обязательном порядке должен быть включён в систему блокировок и защит пылесистемы. При росте t_c выше допустимого уровня необходи-

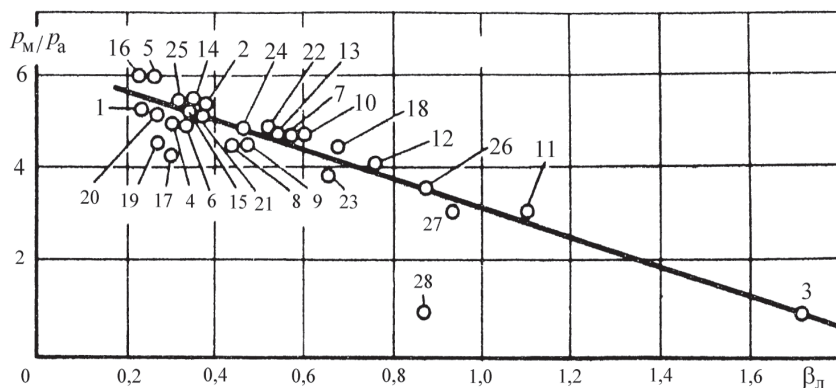


Рис. 2. Зависимость давления взрыва пыли различных топлив от величины β_A , полученная в лабораторной установке. Точками показаны значения для различных видов топлива [1].



мо увеличивать присадку холодных газов и/или увеличивать подачу топлива в мельницу, а при невозможности или неэффективности этих мероприятий в тракт пылесистемы необходимо обеспечить подачу воды или насыщенного пара, а в схемах с промбункером — также подачу инертного газа в бункер пыли. Однако важно обеспечить также нижний допустимый уровень температуры аэросмеси, т. к. её снижение может привести к увеличению влажности пыли, а следовательно к ухудшению устойчивости воспламенения и выгорания топлива, но главное — её величина может стать ниже температуры «точки росы», что приводит к конденсации водяных паров, налипанию и отложению пыли на стенки пылепровода и взрывоопасной ситуации. Величина нижнего предела температуры аэросмеси определяется обычно опытным путём и регламентируется местной инструкцией. Для оперативного прохождения информации о возникновении взрывоопасной ситуации и своевременного срабатывания защит или принятия мер к её ликвидации решающее значение приобретают надёжность измерения t_c и инерционная способность (постоянная времени) измерительного комплекса, которая не должна превышать 20 сек [6]. Вместе с тем необходимость защиты первичных датчиков от агрессивного воздействия высокоскоростного абразивного потока пылегазовоздушной смеси многократно увеличивает их тепловую инерцию вплоть до неприемлемых значений. Так, установка термоэлектрических преобразователей в закрытых чехлах с одновременной защитой последних отбойными щитками приводит в наиболее взрывоопасных переходных и аварийных режимах пылеприготовительных установок (пуск, останов) к запаздыванию импульса до 5 минут. Проводимый исследовательскими организациями на ТЭС поиск компромиссного технического решения, обеспечивающего удовлетворительную эксплуатационную надёжность при приемлемой инерционной способности и точности комплекса измерений, позволил разработать ряд конструкций датчиков температуры, удовлетворяющих этим требованиям [6]. Первичный датчик представляет собой термоэлектрический преобразователь из термоэлектродных проводов хромель и копель с полуоткрытым горячим спаем, заключенный в открытый с рабочего конца чехол из нержавеющей стали.

Одной из наиболее частых причин повышения температуры аэросмеси выше допустимого уровня, пересушки воспламенения пыли в тракте пылесистемы является «обрыв топлива» — прекращение подачи угля в мельницу, в результате его зависания (образования сводов) в бункерах сырого угля или замазывания. В этом случае происходит поступление горячих сушильных газов (250–400°C) в мельницу без охлаждения топливом при одновременном увеличении их расхода

из-за снижения аэродинамического сопротивления тракта пылесистемы, что может привести к дополнительному взвихриванию тлеющих отложений пыли. Во многих случаях в таких ситуациях быстрое действие блокировок не достаточно для предотвращения взрыва. Для обеспечения гарантированной подачи влажных замазывающих топлив из бункера, длины сторон загрузочного окна питателя угля должны составлять более 1,5–2 м. Заводом ОАО «Тяжмаш» (Сызрань) в настоящее время выпускается КПСУ — комбинированный питатель сырого угля, состоящий из широкого ($B \approx 4$ м), короткого ($L \approx 1,7$ м) скребкового питателя, устанавливаемого под бункером, и скребкового транспортера (на базе ПСУ-1100) требуемой по условиям компоновки длины. Питатель и дозатор снабжены собственными автономными приводами. Дозатор КПСУ является громоздким (4,5x4,5x2,5 м) и тяжелым устройством, его транспортирующий узел состоит из трех параллельных скребковых цепных полотен, т.е. он тройне обладает всеми недостатками полотен скребковых питателей. Тем не менее, КПСУ нашел достаточно широкое применение при работе на замазывающих и влажных и взрывоопасных углях не только в России (Приморская ГРЭС и др.), но и за рубежом (ТЭС «Имьинь» (КНР) и др.).

В настоящее время в России для работы на высоковлажных, замазывающих и засоренных посторонними включениями топливах на многих отечественных ТЭС успешно применяются компактные простые и надёжные двухшнековые питатели сырого угля (ДШПСУ). Установка двух шнеков достаточно большого диаметра (до 500 мм) позволяет расширить выходное окно бункера (до 1500x1200 мм и более), а при необходимости увеличить наклон стенок нижней его части, что резко снижает вероятность образования сводов влажного слипшегося топлива. Забор топлива шнеками осуществляется по всему сечению бункера (в отличие от скребковых питателей). При этом шнеки на участке под бункером могут быть выполнены в виде перьевых лопастей, кромками которых разрушаются своды влажного топлива у стенок БСУ. При этом обеспечивается простота обслуживания и ремонта: в конструкции ДШПСУ отсутствуют подвижные тяговые органы, их опоры с подшипниковыми узлами, натяжные устройства и т. д.

При эксплуатации пылесистем необходимо обеспечить стабилизацию суммарного расхода газа через все пылепроводы, т.к. при возникновении отложений пыли в каком-то из пылепроводов растёт давление в распределительном коробе, что может привести к снижению интенсивности роста отложений. При стабилизации давления на входе в систему в случае наличия отложений в пылепроводе и соответственно повышения его сопротивления скорость в нем будет уменьшаться, что может привести к его полному забиванию. Однако

на некоторых ТЭС еще широко используется регулирование со стабилизацией по давлению из-за его простоты.

Необходимость распределения топливной пыли от каждой мельницы по нескольким (до 12) горелкам котла в схемах с прямым вдуванием требует выполнение системы пневмотранспорта пыли в виде параллельных разветвлённых трактов. В действующих нормативных рекомендациях [7] аэродинамический расчёт пылесистемы производится по упрощённому методу – рассчитывается сопротивление наиболее длинного тракта с целью определения требуемого напора для выбора тягодутьевого оборудования в предположении равномерного распределения расхода газов по всем трактам. В эксплуатации же самопроизвольно устанавливаются такие расходы, при которых в коротких пылепроводах имеет место повышенная скорость газов (которая обуславливает повышенный их износ), а в длинных — пониженная, при этом её уровень может снизиться до критической скорости пневмотранспорта (при которой пыль выпадает на стенки пылепровода) — $W_{кр}$. Это может привести к отложениям пыли, возникновению взрывоопасной ситуации и забиванию пылепроводов, а также к нерасчётному режиму различных горелок. Установка дроссельных диафрагм на коротких участках в большинстве случаев не приводит к желаемому результату, т. к. из-за очень высоких местных скоростей в узких проходных сечениях они очень быстро изнашиваются. Следовательно, при проектировании необходимо производить расчёт всей системы пылераспределения и её оптимизацию, что с учётом взаимного влияния, скоростей и концентраций является весьма трудоёмкой и достаточно сложной математической задачей, особенно для двухступенчатых систем пылераспределения, которые для мощных энергоблоков находят всё большее применение. В ОАО "НПО ЦКТИ" разработаны математическая модель, компьютерная программа и на их основе — методика проектного расчёта системы многоступенчатой системы распределения пыли по горелкам котла, применение которых позволяет на стадии проектирования обеспечить уровень скоростей и концентраций в параллельных пылепроводах в многоступенчатой разветвлённой системе пылераспределения, необходимый для исключения образования в них отложений пыли [8]. Эти методики успешно использованы при создании ряда энергоблоков 200–800 МВт.

Расчётный анализ по данной методике показал, что на скорость газов в параллельных пылепроводах очень существенное влияние оказывает величина доли топлива, поступающей в них из входного канала (рис. 3). В случае обычной входной концентрации пыли в газе 0,6 кг/кг при изменении значения r от 0,5 до 0,9 (что из-за отжатия пыли к стенкам каналов в поворотах, сепараторах и т. д., и движении её в виде слоёв вдоль стенок —

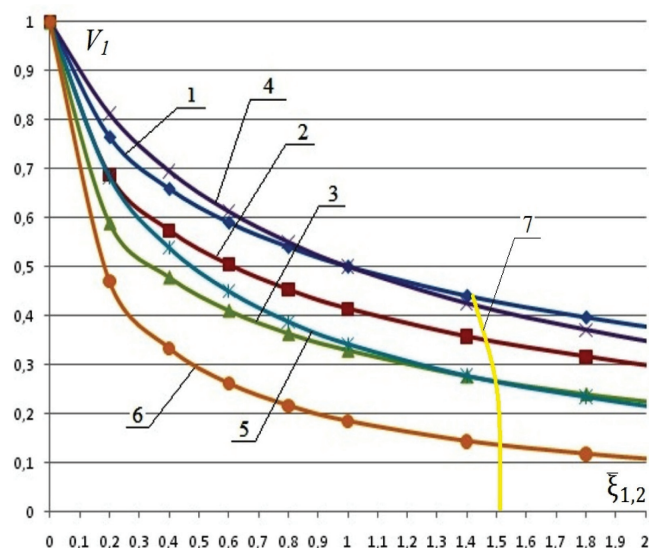


Рис. 3. Зависимость величины доли газов v_1 , поступающих в один из двух пылепроводов, от величины относительного коэффициента сопротивления $\xi_{1,2} = \xi_1/\xi_2 (F_2/F_1)^2$ — при различных входных концентрациях μ и долях пыли r , поступающей в пылепроводы (F_1 и F_2 — площади сечения первого и второго пылепровода). Кривые 1–3 при $\mu = 0,6$ кг/кг и соответственно 1 — при $r = 0,5$; 2 — при $r = 0,7$; 3 — при $r = 0,9$. Кривые 4–6 — при $\mu = 3,0$ кг/кг, 4 — $r = 0,5$; 5 — $r = 0,7$; 6 — $r = 0,9$. Штрихпунктирная кривая 7 — в случае $W_1 < W_{кр}$ и при $\mu = 0,5$ кг/кг, $r = 0,5$; $W_{кр}$ соответствует $v_{1,кр} = 0,45$.

частое явление [9]), соотношение поступающих в них газов соответственно уменьшается с 0,5 до 0,33, т. е. скорость газов в одном из пылепроводов снижается в 1,5 раза, а при входной концентрации 3 кг/кг — до $V_1 = 0,185$. Эти результаты подтверждают необходимость установки в пылесистеме распределителей пылегазового потока высокой эффективности, обеспечивающих выравнивание расходов топливной пыли по отводам, не только для обеспечения эффективной работы топки, но и для обеспечения надёжного пневмотранспорта и условий взрывобезопасности [10]. При достижении скорости потока в одном из пылепроводов критического уровня (менее $W_{кр}$) происходит быстрое его забивание (кривая 7) в результате резкого возрастания его сопротивления и повышения расхода газов через параллельный пылепровод.

Практика и исследования показали, что эффективным методом повышения взрывобезопасности пылесистем, одновременно обеспечивающим повышение сушильной производительности (при поступлении углей повышенной влажности) и снижение образования токсичных оксидов азота является перевод пылесистем с воздушной на газовую сушку топлива. При содержании кислорода в сушильных газах менее 16% для подавляющего большинства топлив развитие взрыва становится практически невозможным. На многих ТЭС забор газов в пылесистему осуществляется при температуре $450 \div 500^\circ\text{C}$, что не требует дополнительных футерованных газоходов и обеспечивается установкой серийных дымососов рециркуляции



(ДРГ). Для схем с промбункером наиболее просто это осуществляется отсосом продуктов сгорания в пылесистему из конвективной шахты котла за счет разрежения, создаваемого существующим мельничным вентилятором. Реконструкция пылесистем на работу по этой схеме выполнена на ряде ТЭС, оборудованных пылесистемами с промбункером и сжигающих высокорреакционные и весьма взрывоопасные каменные угли марок Г, Д, ЗСС (Бурштынская ГРЭС, Ладыженская ГРЭС и др. на Украине, Томь-Усинская ГРЭС, Беловская ГРЭС и др. в России). Преимуществом данной схемы является простота, недостатком – возрастание присосов холодного воздуха, вследствие увеличения протяженности участков схемы, находящихся под повышенным разрежением. Кроме того, достаточно сложно обеспечить плотность узла забора газов из конвективной шахты при высоком разрежении в месте отбора газа (чаще всего перед воздухоподогревателем до 200 кг/м^2); имеет место также озоление топлива, что в некоторых случаях обуславливает необходимость установки очистки газов рециркуляции. При этом для пылесистем, имеющих тракты, работающие под разрежением, важнейшим узлом являются уплотнения входных патрубков мельниц. В настоящее время ОАО "НПО ЦКТИ" совместно с ОАО "Тяжмаш" разработало и внедрило новую конструкцию уплотнений, обеспечивающую снижение присосов до 5–10%, что повышает как экономичность, так и взрывобезопасность котельной установки [11]. Достаточно распространённая схема с отбором уходящих газов за дымососом котла с их подачей в пылесистему с помощью ДРГ, хотя и является наиболее простой и малозатратной, может приводить к ограничению сушильной производительно-

сти установки, а также к снижению экономичности котла, и может быть принята только на основе технико-экономического анализа.

Литература

1. Самовозгорание и взрывы натуральных топлив / В. В. Померанцев, С.Л. Шагалова, В. А. Резник и др. // Л. Энергия 1978 г.
2. Инструкция по обеспечению взрывобезопасности топливоподач и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. СО 153.34.03.352–2003. М. ЦПТИ ОРГРЭС, 2004 г.
3. Правила взрывобезопасности топливоподач и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. РД 153-34.1-03.352-99 М.1999.
4. Исследование взрывов пыли в системе пылеприготовления с прямым вдуванием. / В. В. Кушнарченко, В. В. Федчишин и др. // Теплоэнергетика, № 4, 1997.
5. Исследование системы пылеприготовления с ШБМ без взрывных клапанов в помещении котельного цеха. / В. В. Елизаров, В. В. Поляков, Я. Н. Сколяров и др. // Теплоэнергетика, №2, 1990.
6. Рекомендации по усовершенствованию узлов и элементов систем пылеприготовления котельных установок. РД 153-34.1-119-2001 М. 2001.
7. Нормативные материалы по расчёту и проектированию пылеприготовительных установок котельных агрегатов. Л 1971 г.
8. Лейкин В. З. Расчётный анализ пневмотранспорта угольной пыли. Электрические станции, № 12, 2011.
9. Лейкин В. З., Лузин П. М. Проблема равномерного распределения мелкодисперсной топливной пыли по горелкам и концепция её решения. Энергосбережение и водоподготовка, №4(78), 2012.
10. Разработка и внедрение на ТЭС новых конструкций распределителей пылегазового потока перемешивающего типа / В. З. Лейкин, И. А. Позин, А. К. Агапов и др. // Электрические станции, №7, 2008 г.
11. Современные технологии и оборудование подготовки твёрдого топлива / Н. С. Клепиков, В. З. Лейкин, В. В. Абыденников и др. // Электрические станции, № 6, 2010.

