

# Условия безопасной работы аппаратов термической сушки угля

В статье представлена сравнительная информация об аппаратах, применяемых сегодня в России и за рубежом при термической сушке угля мелких классов. В первой части статьи указываются причины возгорания угля при сушке, а также рассматриваются сушильный барабан и сушка в виброкипящем слое. Во второй части рассматриваются микроволновые излучатели, труба-сушилка, паровая сушилка и др.

Наряду с техническими и технологическими особенностями авторами анализируется экономическая составляющая применения указанных аппаратов.

**Ключевые слова:** термическая сушка угля, сушильный барабан, сушка в кипящем слое, труба-сушилка, влага угля.

**Контактная информация:**

e-mail: vak@cetco.ru; kirillov@cetco.ru

Одной из основных целей модернизации углеобогащительных фабрик является снижение потерь угля и повышение качественных характеристик конечного продукта. Увеличение глубины обогащения как базовый фактор при разработке проектов модернизации повышает объемы концентрата, одновременно увеличивая долю угольных продуктов мелких классов с высокой степенью влажности. Аппараты механического обезвоживания не всегда обеспечивают требуемый сегодня рынком показатель конечной влажности указанных классов. Необходимость строительства сушильных установок в составе обогащительных фабрик снова становится насущным вопросом, от решения которого зависит будущее угольных предприятий в новых, более жестких, конкурентных экономических условиях. Первый шаг на этом пути — выбор оптимального и безопасного аппарата для сушки угля.

## ПРИЧИНЫ ВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ ПРИ СУШКЕ

В настоящее время выпускается множество сушильных аппаратов для твердых сыпучих материалов с размерами частиц до 50 мм, с возможностью достижения конечной влажности 0,5-5% при диапазоне начальной влажности 10-30%. Это, прежде всего, сушильные барабаны, сушилки в кипящем и виброкипящем слое, ленточные сушилки и



**Владимир ГАРБЕР**

Руководитель Инженерного бюро сушки и сжигания топлив, доктор-инженер *Vyö Feuerungstechnologien, Dßseldorf, Germany*



**Вадим КОЗЛОВ**

Главный технолог Угольного департамента Коралайна Инжиниринг — CETCO



**Кирилл КИРИЛЛОВ**

Руководитель проектов Угольного департамента Коралайна Инжиниринг — CETCO

др. Эти аппараты в настоящее время прекрасно работают при сушке промышленных материалов, таких как концентраты руд металлов, пески и т.п. Но какие из них можно безопасно применять для сушки углей, и чем вызваны возгорания углей в сушильных аппаратах, взрывы в аппаратах или системе пылеулавливания и подобные явления, вызывающие опасение, а порой и нежелание руководителей угольных предприятий применять термическую сушку угля?

Основной ошибкой при выборе сушильного аппарата и построения сушильного комплекса является формальный подход к рассмотрению при проектировании вопросов взрыво — и пожаробезопасности, базирующийся на устаревших нормативных документах [1, 2], а также отсутствие у проектировщиков современных методик расчета сушки органических топлив, таких как уголь, торф, мелкие древесные материалы.

Начнем с рассмотрения сушильных барабанов, так как это основной аппарат, применяемый в России и в мире для сушки кусковых твердых материалов.

## СУШИЛЬНЫЙ БАРАБАН

В рекламных материалах широко известно еще с советских времен производителя сушильных комплексов на базе барабанных вращающихся сушилок — Бердичевского машиностроительного завода «Прогресс» — написано следующее: «Сушилки барабанные вращающиеся БН (диаметром до 3,5 м) являются аппаратами непрерывного действия. Предназначены для удаления влаги (сушки) невзрывоопасных, непожароопасных, нетоксичных сыпучих материалов» [3]. Эта информация говорит о том, что барабанные сушилки не предназначены для сушки углей. В чем причины непригодности?

**Причина конструктивного характера.** Давление при взрыве подсушенного мелкодисперсного угольного материала достигает 9,5 бар. Цилиндрический корпус сушильного барабана с толщиной стенки 20-30 мм, как правило, выдерживает кратковременное взрывное давление без заметных деформаций. Загрузочная и разгрузочная (рис. 1) камеры сушильного барабана имеют плоскую вертикальную фронтальную стенку, плоский торцевой люк, которые конструктивно

не выдерживают взрывного давления ни поотдельности, ни тем более в сборе с сушильным барабаном через эластичные, лабиринтные или другие узлы уплотнения.

Торцевые камеры сушильных барабанов не имеют предохранительных взрывных клапанов, рассчитанных на сброс продольной взрывной волны.

**Причина технологического характера.** Условием возникновения взрыва или возгорания угля являются наличие в одном аппарате одновременно трех факторов — так называемый «треугольник взрывоопасности»:

— наличие в объеме аппарата мелкодисперсного угольного материала — это сушильный барабан обеспечивает;

— наличие источника воспламенения температурой 250-450°C — это также имеется, так как сушка ведется горячими газами с температурой до 600-700°C;

— наличие достаточного количества кислорода в горячих газах.

Какой уровень содержания кислорода в газах является безопасным? Российские нормативные документы однозначно трактуют этот вопрос. В «Инструкции по обеспечению взрывобезопасности топливоподач и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива» [1] сказано: «5.5.1 Взрывоопасное состояние наступает:

— при повышении содержания кислорода свыше 16 % в пылегазовой смеси за пылеприготовительной установкой при газовой сушке топлива»...

«Правила безопасности при обогащении и брикетировании углей (сланцев)» [2] уточняют эти значения:

«Требования по безопасной эксплуатации газовых сушильных установок:

— 408. При работе газовой сушильной (классификационной) установки объемное содержание кислорода в отработавших газах (перед или после дымососа) в пересчете на сухой газ не должно превышать:

16 % — при сушке сланцев;

18 % — при сушке бурых и каменных углей с выходом летучих веществ более 35 %;

19 % — при сушке каменных углей с выходом летучих веществ менее 35 %».

Однако по опыту работы немецких сушильно-помольных установок содержание кислорода нужно поддерживать на уровне менее 9%. При 10% необходимо автоматически отключать установку и принудительно инерттизировать внутренний объем сушильного аппарата. Правильность такого поведения подтверждает тот факт, что на более чем 800 немецких установках для сушки и одновременного помола угля (это опаснее, чем просто сушка) за 50 лет эксплуатации не было взрывов и возгораний.

Обеспечить содержание кислорода в объеме сушильного барабана на уровне менее 9% непросто. Основная причина — неплотности в местах контакта вращающегося барабана и торцевых камер, места загрузки и выгрузки материала, а также в системе газоочистки. На технологических линиях с использованием сушильных барабанов, где не принимаются специальные меры, например уплотнение загрузки и выгрузки материала, общий суммарный уровень присосов внешнего воздуха с содержанием кислорода 21 % часто составляет более 30% по отношению к топочным газам.

Но даже с учетом внесения изменений в конструкцию сушильного барабана и мест сочленения вращающегося барабана и торцевых камер, суммарный уровень присосов в сушильном комплексе (сушильный барабан с узлами



Рис. 1. Торцевая часть сушильного барабана в месте разгрузки материала

загрузки и выгрузки, система газоочистки, газоходы) возможно снизить только до 11-15%.

За счет применения самоинерттизации сушильной системы (возврата части отходящих после сушки газов) содержание кислорода в греющих газах можно снизить до 10-15%, но не до уровня 8-9%, требуемого европейскими правилами техники безопасности для горючих материалов. В России и странах СНГ нет ни одной технологической линии для сушки угля, оборудованной в соответствии с современными знаниями и европейскими требованиями.

Проблемой эксплуатационно-технологического характера является также количество угля, находящееся в объеме сушильного аппарата при сушке.

Производственная ситуация, ведущая к возгоранию угля или взрыву в сушильном барабане, развивается по сценарию А-Б-С-Д-Е, описанному ниже:

- А. Рабочий процесс сушки с равномерной загрузкой влажного угля в сушильный барабан (рис. 2): загрузка 100 т/ч влажного угля, время нахождения угля в сушильном барабане 15-20 мин. В барабане находится 25-30 т угля с влажностью, например, 15% в районе загрузки и 5% — в районе выгрузки;
- Б. По производственным причинам на 5-10 мин снижается подача влажного угля в сушильный барабан. Датчик температуры отходящих газов (по которой обычно регулируют подачу топлива) реагирует на это событие с задержкой в 2-5 мин;
- С. Топочное устройство кирпичной кладки, являясь инерционным аппаратом (на колосниковой решетке постоянно находится около 30% часового расхода топлива), реагирует на сигнал об изменении подачи топлива с задержкой. Суммарное время



Рис. 2. Схема работы сушильного барабана [3]

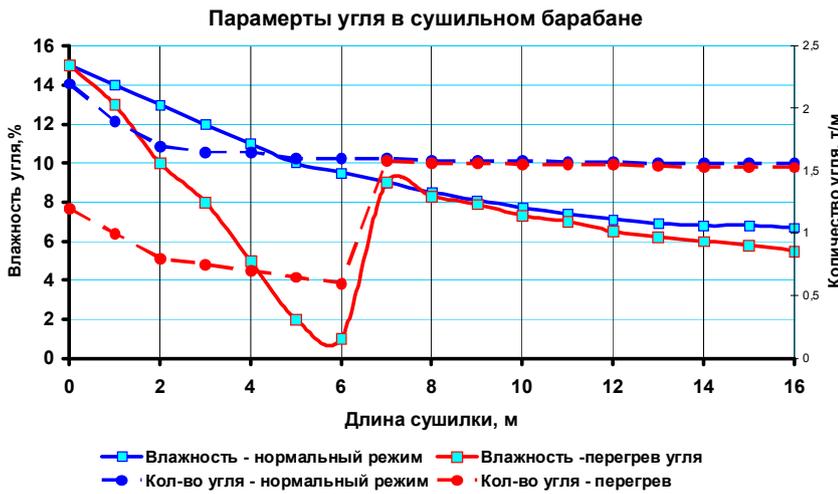


Рис 3. Распределение массы угля и изменение влажности угля по длине сушильного барабана при равномерной загрузке и при снижении загрузки до 50% на время 5-10 мин.

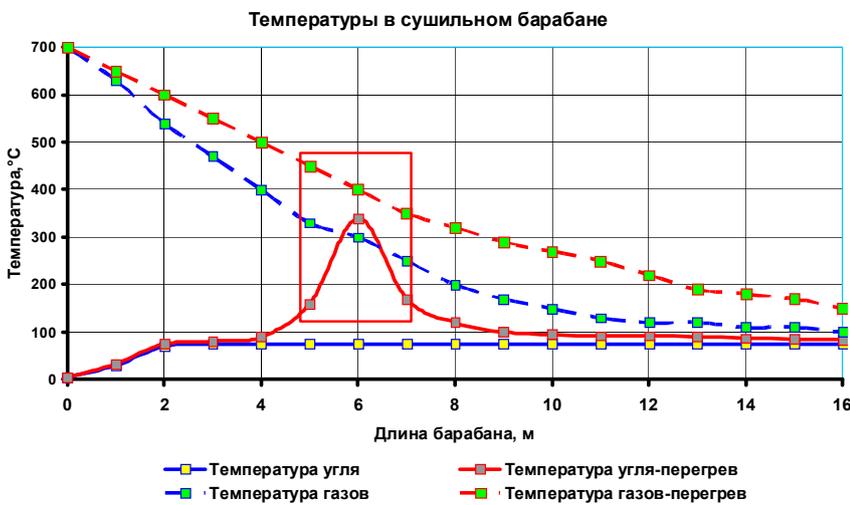


Рис 4. Изменение температур угля и газов по длине сушильного барабана при равномерной загрузке и при снижении загрузки до 50% на 5-10 мин. Показана зона воспламенения.

задержки реакции топки на изменение уровня загрузки в сушильный барабан влажного угля может составлять 10 мин и более;

- Д. В сушильном барабане возникает зона возгорания: — уголь высушился до конечной влаги к середине аппарата (рис. 3);

— сухой уголь начинает перегреваться до температур 150°C и более; — начинается заметный выход из угля летучих составляющих; — в середине барабана повышается уровень температуры горячих газов; — начинается тление отложений угля на поверхности лопаток сушильного барабана и возгорание на поверхности мелких частиц.

В описываемой ситуации изменение температуры газов за сушильным барабаном (рис. 4) от уровня нормального режима до режима перегрева и воспламенения угля может составлять всего около 50°C.

При этом температура пересушенного угля в середине сушильного барабана уже превышает нормальный уровень на 150-200°C. Оператор не успевает отреагировать, а часто и не имеет оперативных средств для быстрого регулирования температуры;

- Е. Далее процессы развиваются очень быстро:

- уголь возгорается;
- в сушильном барабане возникает мощный внутренний источник выделения тепла — горячий высушенный уголь (количество угля в аппарате — 20-30 т), — который по мощности превышает топочное устройство в несколько раз (топка потребляет угля около 5 т/ч).

Весь находящийся в аппарате и системе газоочистки уголь быстро высушивается и загорается. При определенных условиях вслед за возгоранием возникает взрыв.

Для борьбы с возникшим возгоранием, в соответствии с нормами проектирования, за сушильным аппаратом при сушке угля должна быть предусмотрена разгрузочная камера с объемом, позволяющим выгрузить из барабана весь горячий уголь, не передавая его для дальнейшей транспортировки. При производительности 100 т/ч вес выгружаемого угля составляет до 30 т, объем камеры для тушения составляет около 50 м<sup>3</sup> (насыпная плотность высушенного угля — 0,6-0,7 т/м<sup>3</sup>). Камера разгрузки и тушения угля должна выполняться во взрыво — и пожарозащищенном исполнении.

По описанным выше причинам изготовители сушильных барабанов не могут нести ответственности за процесс сушки в стандартных вращающихся барабанах твердых органических топлив. Этими же причинами объясняется нежелание многих руководителей строить сушильные отделения в составе углеобогатительных фабрик, даже несмотря на быструю окупаемость и высокую экономическую целесообразность сушки.

### СУШИЛКИ ВИБРОКИПАЮЩЕГО СЛОЯ

Сушилки виброкипящего слоя, как и сушильные барабаны, являются аппаратами с длинной камерой сушки с соотношением ширины и длины около 1: 6 (8) (рис. 5).

Рассмотренные выше процессы возгорания угля могут происходить в сушилках с псевдоожиженным сло-



Рис. 5. Сушилка виброкипящего слоя в сборе и без газосборной камеры [4]



Рис. 6. Схема работы сушилки виброкипящего слоя [4]



Рис. 7. Подвод горячих газов к сушилке виброкипящего слоя [4]



Рис. 8. Установка термической сушилки на основе виброкипящего слоя с псевдооживленным слоем [5]

ем по такому же сценарию. При этом есть следующие отличия:

- аппарат имеет сложную геометрию. Конструкция сушильной камеры, в отличие от цилиндрического сушильного барабана, не рассчитана на давление взрыва;

- сушильная камера показанной выше конструкции разделена на подвижное вибрирующее дно и верхнюю осадительную или газосборную камеру, установленную на стационарных опорах (рис. 6). Соединение между камерами выполнено в виде эластичного тканевого компенсатора со сторонами, например, около 3х18 м для аппаратов большой производительности;

- подвод горячего воздуха выполняется в вибрирующую нижнюю камеру, ниже газораспределительной решетки, через 6-10 подводящих патрубков диаметром около 400 мм, через эластичные тканевые компенсаторы (рис. 7).

Отвод отработанных газов после сушилки выполнен через один или несколько патрубков, также соединяемых с аппаратом через тканевые компенсаторы.

Использование в конструкции сушилок с псевдооживленным слоем множества тканевых компенсаторов обуславливает потерю аппаратом газоплотности даже от минимального давления при взрыве. По этой причине сушильная камера не оборудована взрывными клапанами, так как эластичные уплотнения «срабатывают» раньше, чем взрывные клапаны;

- температуры горячего воздуха (газа) для сушилок виброкипящего слоя принимаются на уровне 350—400°С и ограничены температурной стойкостью внутренней вибрирующей газораспределительной решетки и еще в большей степени — стойкостью эластичных тканевых компенсаторов.

Использование в сушилках виброкипящего слоя относительно низких по сравнению с сушильными барабанами, температур горячих газов снижает тепловую эффективность этих аппаратов, пропорционально повышает объем отходящих газов на систему газоочистки и дымосос. Это обуславливает высокие капитальные затраты при приобретении оборудования газоочистки и высокие расходы электроэнергии на транспортировку газов при эксплуатации;

- низкие температуры теплоносителя — горячих газов — затрудняют обеспечение самоинертизации сушильной системы за счет всем хорошо известного метода — возврата части отработанных газов на подмес к продуктам сгорания топлива;

- продолжительность сушики в аппаратах виброкипящего слоя составляет 5-10 мин. Во время первичного заполнения толщина слоя материала на решетке увеличивается. При производительности 100 т/ч по высушенному продукту, на решетке сушилок виброкипящего слоя находится 5-10 т угля. Необходимый объем камеры пожаротушения для выгрузки возгоревшегося угля составляет 10-15 м<sup>3</sup>. Камера разгрузки и тушения угля должна выполняться во взрыво — пожарозащищенном исполнении.

Несмотря на сложность адаптации сушилок виброкипящего слоя под условия безопасной сушики угля в части обеспечения прочностных показателей и газоплотности аппарата, возгорания в них происходят реже, чем в сушильных барабанах. Объясняется это следующими факторами:

- пониженная температура горячих газов при сопутствующем снижении тепловой эффективности аппарата;

- использование в основном для кускового угля. Сушка угля мелких классов повышает опасность возгораний и взрывов;

- сушилки виброкипящего слоя разработаны сравнительно недавно и в комплексе с ними используются более современные генераторы горячих газов;

- как правило, в установках с сушилками виброкипящего слоя используется метод самоинертизации путем возврата части отходящих газов, имеющих пониженное содержание кислорода. Это снижает общий уровень кислорода в объеме аппарата и повышает пожаро — и взрывобезопасность установок;

- изготавливаются также сушилки виброкипящего слоя, в конструкции которых вопросам взрывобезопасности уделено большее внимание. В этих сушилках нет эластичного компенсатора между вибрирующим дном и верхней камерой (рис. 8), что повышает газоплотность аппарата и его безопасность.

#### Список литературы

1. Инструкция по обеспечению взрывобезопасности топливоподач и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. СО 153-34.03.352-2003.
2. Правила безопасности при обогащении и брикетировании углей (сланцев). ПБ 05-580-03.
3. <http://www.progress.ua/ru/catalogue/42/205>.
4. <http://binder-co.esystems.at>
5. <http://www.allgaier.de>