

УДК 622.771.6

# Термическая сушка углей с ВЫСОКИМ ВЫХОДОМ ЛЕТУЧИХ

Приведен анализ современных технологий сушки углей с высоким содержанием летучих. В промышленности применяют паровые сушилки с кипящим слоем, в которых в качестве теплоносителя – инертный азот, а необходимую теплоту получают за счет отходящих газов газификатора. При этом теплопередача осуществляется посредством горячей воды.

**Ключевые слова:** уголь, сушка, летучие, теплоноситель, азот.

**Контактная информация:** [anatoliy.kirnarsky@ed-mg.de](mailto:anatoliy.kirnarsky@ed-mg.de)

**Т**ермическая сушка углей с выходом летучих требует разработки специального технологического режима для предотвращения возгорания и взрыва угля, для чего необходимо до минимума сократить содержание кислорода в сушильном агенте. Основной принцип – исключение прямого контакта угля и теплоносителя – реализован в сушилках непрямого нагрева, главный конструктивный элемент которых – барабан, снабженный рубашкой для обогрева паром или другим теплоносителем. Недостаток данного решения – низкая эффективность сушки – поскольку в любой момент только часть угля контактирует с прогретой поверхностью вращающегося сушильного барабана и, как следствие, снижается скорость теплопередачи.

Для устранения этого недостатка рабочая полость сушильного барабана заполняется множеством цилиндрических трубок, через которые пропускается пар или другой теплоноситель [1]. За счет увеличения площади контакта возрастает скорость теплопередачи и эффективность самого процесса термической сушки. Отрицательная сторона технологии заключается в переизмельчении материала и образовании большого количества угольной пыли, что увеличивает взрывоопасность процесса.

В этом отношении выгодно отличается другое технологическое решение [2], согласно которому ранее упомянутые трубки используют для перемещения под действием собственной массы просушиваемого угля, в то время как теплоноситель подается в рабочую полость сушильного барабана, тем самым обеспечивая подвод теплоты к наружной поверхности трубок. Как результат, уголь просушивается порционно без переизмельчения. Диаметр трубок обычно 150 мм. При сушке угольной мелочи крупностью –3 мм ее влажность снизилась с 20 до 4%. Температура на поверхности трубок была более 120 °С. Производительность по исходному углю промышленных сушильных агрегатов такого типа от 95 до 420 т/ч (на сухую массу), влажность сушонки – на уровне 4,5–8%. Установки полностью автоматизированы. Основные регуляторы процесса – частота

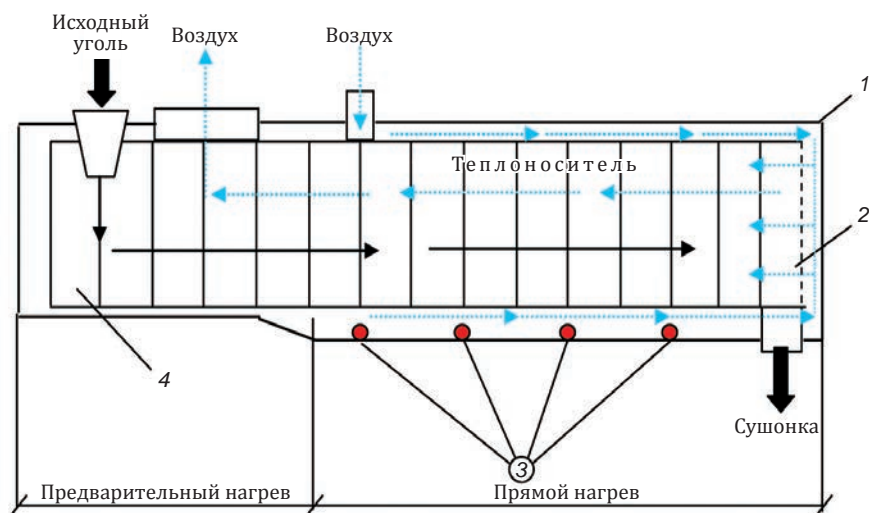


**А. С. КИРНАРСКИЙ,**  
доктор техн. наук  
(«Инжиниринг Доберсек ГмБХ»,  
Германия)

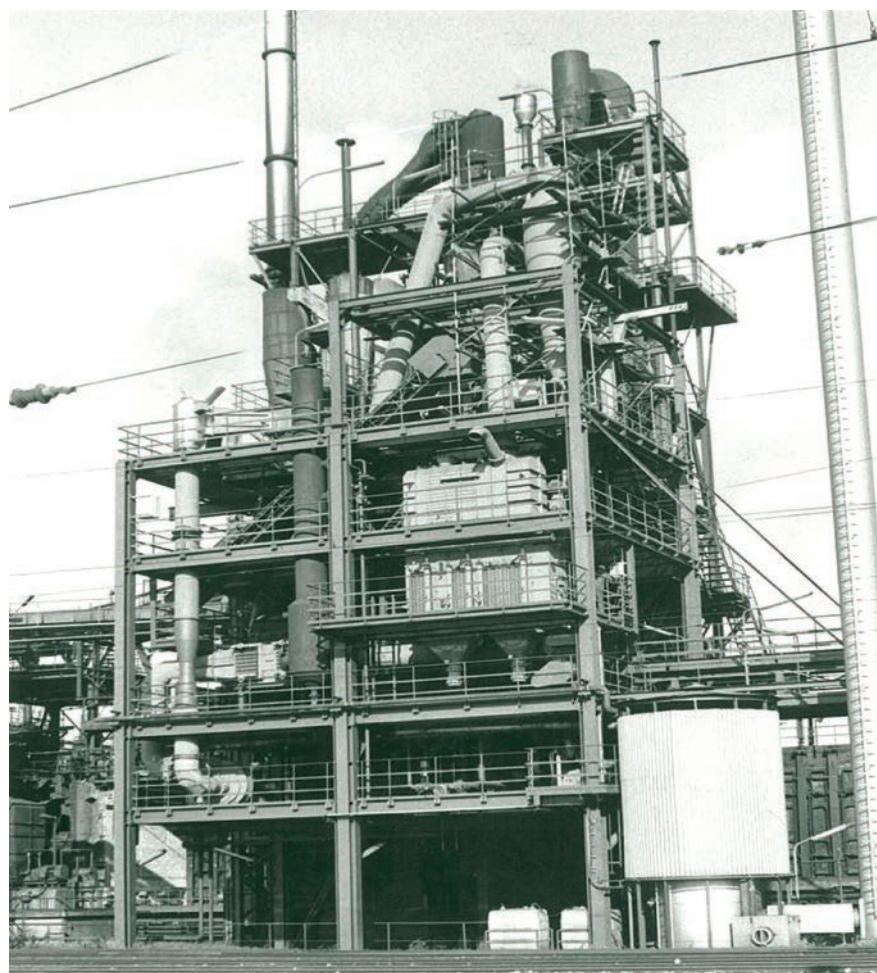
вращения сушильного барабана и давление пара, применяемого в качестве теплоносителя. Давление пара достигает 1000 кПа. Диаметр сушильного барабана производительностью 220 т/ч составляет 6,5 м, а его длина – 9 м. Количество трубок – 150 шт.

Комбинированная сушка прямого и косвенного нагрева описана в патенте [3], согласно которому сушильный агрегат (рис.1) включает цилиндрический вращающийся сушильный барабан, встроенный в топку с горелками. Барабан покрыт термопластинами, которые на участке предварительного косвенного прогрева размещены так, что обеспечивают перемешивание воздуха, а на участке прямого нагрева их используют, чтобы направить воздух в сушильный барабан.

При попадании влажного угля в сушильный барабан происходит его не прямой нагрев с помощью горячих топочных газов, которые прогревают внешнюю поверхность барабана. При прохождении 1/3 длины рабочей зоны начинается переход на прямой нагрев при прямом контакте угля и теплоносителя.



**Рис. 1.** Сушильный барабан с комбинированной системой нагрева: 1 – топка; 2 – сушильный барабан; 3 – горелки; 4 – термопластины; —> поток воздуха; —> уголь.



**Рис. 2.** Сушилка с кипящим слоем для обработки коксующегося угля.

ля. Прямая теплопередача осуществляется в противоточном режиме.

Более совершенные по скорости массопереноса и теплопередачи – сушилки с кипящим слоем. Некоторые их разновидности могут применяться при обработке углей с высоким содержанием летучих. Одна из таких конструкций – многостадийная сушилка с кипящим слоем. Известна двухстадийная сушилка [4], в которой на первой стадии исходный уголь крупностью –5 мм подвергается сушке в кипящем слое при температуре 150–290 °С и скорости воздуха 1,2–2,4 м/с, а на второй стадии при температуре 290–350 °С и скорости воздуха 2,4–3,7 м/с. Основная часть влаги (40–60 %) удаляется на первой стадии, в то время как на второй стадии влажность материала сокращается только на 1 %.

Во время сушки материала в кипящем слое захватывается высокодисперсная фракция рабочим потоком, для чего на выходе предусмотрен пылеулавливающий циклон. Чтобы удалить остаточную влагу из воздушного потока, устанавливаются конденсаторы. Такая очистка сушильного агента обеспечивает его циркуляцию при условии смешивания с порцией горячего воздуха перед подачей в рабочую зону сушилки. В один прием скорость восходящего воздушного потока составляет не менее 5,5 м/с, что может нарушить нормальный режим оживления угля. Чем больше стадий кипящего слоя, тем меньше удельный расход энергии (кДж/кг влаги), ниже капитальные и эксплуатационные затраты



и менее строгие требования к качеству сушильного агента. Для повышения теплового КПД сушилки с кипящим слоем оборудуют погружными теплообменниками [5]. В этом случае конвективная теплопередача посредством газового потока дополняется кондуктивной ее формой за счет размещения теплообменников в слое оживаемых частиц. Так как значительные коэффициенты теплопередачи зависят от гидродинамического режима, необходимо учитывать месторасположение, форму и свойства погружных термоэлементов, а также характеристики газового потока и оживленного слоя. Так, качество оживления частиц определяется преимущественно их крупностью и формой.

При обработке углей с высоким выходом летучих безопаснее и экономичнее применять паровые сушильные агрегаты с кипящим слоем, которые недавно разработаны в Японии и ФРГ [6] и отличаются не только высокой теплопередачей, но и утилизацией скрытой теплоты сушильного агента. Одна из первых установок типа HDC 360 была запущена в эксплуатацию в 1983 г. в Германии при сушке коксующегося угля с содержанием летучих 21–24 % на коксохимическом заводе в г. Боттроп (рис. 2). Производительность такого сушильного агрегата составляет 10 т/ч, влажность материала на входе и выходе соответственно – 12 и 0,1 %. В качестве теплоносителя применялся насыщенный пар в условиях замкнутого парового цикла. Температура сушонки достигала 200 °С.

Примером современных (рис. 3) сушильных агрегатов с кипящим слоем может быть сушилка типа HDC 9250. Шесть таких сушилок в настоящее время запущены в эксплуатацию на тепловой электростанции IGCC в штате Миссисипи (США) для термической обработки бурого угля влажностью 46 %. Конечная влажность материала 18 %, содержание летучих в исходном буре угля 19–26 %.

Производительность сушилок типа HDC 9250 составляет 55 т/ч на сухую массу. В каче-

стве теплоносителя – инертный азот, который циркулирует в замкнутом контуре. Необходимую теплоту получают за счет отходящих газов газификатора, при этом теплопередача осуществляется посредством горячей воды. Температура сушонки на выходе достигает 90 °С.

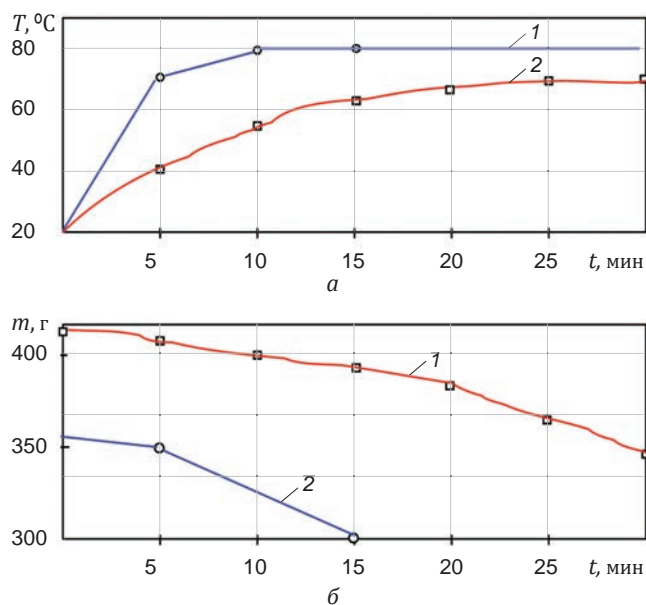
Рассмотренные сушильные устройства работают по принципу поверхностного нагрева, при этом скорость сушки определяется условиями теплопередачи от поверхности вглубь обрабатываемой массы материала.

Для объемного прогрева материала используется микроволновое поле. Согласно технологическому решению, приведенному в патенте [7], исходный уголь сначала разделяется по крупности на крупный, мелкий и тонкий классы. После обогащения указанных машинных классов полученные концентраты подвергаются механическому обезвоживанию, при этом угольный шлам дополнительно проходит еще и термическую микроволновую сушку при температуре ниже 90 °С за счет обработки в диапазоне частот от 915 до 2450 МГц.

Для постоянного контроля поверхностной влажности исходного угля устанавливают фотодатчики над питающим конвейером шириной 1,5–3 м и длиной 30–60 м. В зависимости от исходной влажности накладывается



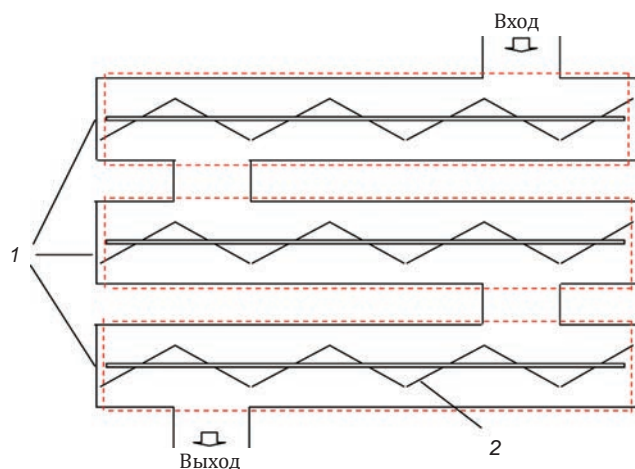
Рис. 3. Монтаж сушилок кипящего слоя HDC 9250 на тепловой электростанции IGCC (США, штат Миссисипи).



**Рис. 4.** Кинетические кривые сушки угля с высоким выходом летучих: *а* и *б* – зависимость времени сушки *t* от температуры нагрева и от массы обрабатываемого угля *m*: 1 – при мощности 1500 Вт; 2 – 750 Вт.

микроволновое поле определенной интенсивности, что исключает перегрев и возгорание угольных частиц.

Кинетические зависимости микроволновой сушки угля низкой степени метаморфизма с высоким выходом летучих представлены на рис. 4 [8]. Кинетические кривые показывают, что скорость процесса микроволновой сушки значительно зависит от мощности поля. Так, при мощности высокочастотного излучения 1500 Вт продолжительность су-



**Рис. 5.** Трехстадийная сушилка на основе винтового конвейера: 1 – кожух; 2 – винтовой конвейер.

шильного цикла вдвое меньше, чем при мощности 750 Вт. Во избежание перегрева материала рабочая температура поддерживается не выше 105 °С. Из рис. 4, б следует, что на показатели микроволновой сушки влияет также масса материала. Это вызвано неравномерностью его прогрева, для чего стараются, чтобы частицы в процессе сушки находились в подвижном состоянии.

Микроволновая обработка предшествует основному процессу термической сушки или завершает ее. При установке микроволновой сушилки перед основным сушильным агрегатом эффективно реализуется объемный прогрев материала, в результате внутренняя влага вытесняется на поверхность твердых частиц, тем самым создавая идеальные условия для последующего конвективного теплообмена.

Если микроволновая сушилка следует за обычным сушильным агрегатом, то ее назначение сводится к испарению 30 % наиболее трудноудаляемой влаги. Например, сушилка кипящего слоя дополняется микроволновым генератором, при этом размер отверстий решетки, через которую подается восходящий поток газа, меньше длины волны в рабочем диапазоне частот, что исключает утечку высокочастотного излучения в окружающее пространство. Одна из таких сушилок заявлена в патенте М. Долинга [9], который предложил использовать энергию отраженных волн, причем распределительная решетка служит не только для перемещения материала и создания восходящего потока газового агента, но и отражения волн, энергия которых используется более эффективно, вследствие чего скорость процесса термической сушки возрастает в 2–4 раза.

Побочный полезный эффект при использовании микроволновых генераторов – десульфурация обрабатываемого угля, в результате разрушение пиритной серы ( $\text{FeS}_2$ ) с выделением сернистых соединений типа  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{SO}_2$ , а при микроволновой обработке тонкоизмельченного угля в щелочных растворах степень десульфурации составляет 70–80 % без ухудшения его коксующей способности [10]. Несмотря на перспективность микроволновой сушки угля, практическое его применение ограничено из-за значительных капитальных и эксплуатацион-

ных расходов, а также по причине возгорания угля при локальном перегреве.

Чтобы повысить надежность сушки углей с высоким выходом летучих, были разработаны сушильные устройства непрямого нагрева на основе винтового конвейера. Наличие вращающегося винта в таких устройствах обеспечивает высокий коэффициент теплопередачи, численное значение которого составляет 45–102 Вт/(К·м<sup>2</sup>). Для повышения теплового КПД и сокращения энергозатрат увеличивают степень заполнения и рабочую температуру. Скорость сушки возрастает во время эксплуатации на пониженном давлении среды.

Типовая конструкция сушилки (рис. 5) включает корпус с кожухом, который прогревается с помощью горячей воды или теплоты, при этом влага удаляется в несколько стадий [11]. На первой стадии уголь просушивается в открытом корпусе при температуре 80–150 °С до влажности 8–12 %, после чего поступает в отдельный герметичный барабан, где сушится при температуре 90–260 °С под избыточным давлением пара (50 кПа,) а затем на заключительной фазе сушонка охлаждается и разрушается в бункер. Изменение интенсивности прогрева с быстрой на медленную в случае двухступенчатого перехода обеспечивает смещение низколетучих углеводородов к поверхности угольных зерен и, как следствие, купируются поры и сводится к минимуму повторная адсорбция жидкой фазы.

При обработке на такой сушилке угля с высоким выходом летучих в качестве теплоносителя используется перегретый пар или азот. Выбирая типоразмер сушилки, учитывают физические свойства угля (крупность, абразивность, угол внутреннего трения, содержание летучих) и параметры агрегата (производительность, степень заполнения, диаметр и скорость винта, мощность приводного двигателя).

Другой подход – применение сушилок прямого нагрева, в которых сушильный агент – это перегретый пар (SSD). В принципе, обычную сушилку прямого нагрева можно перевести в режим SSD-установки. Известно, что в качестве теплоносителя предпочтительнее перегретый пар, но только в последнее время этот подход практически воплощается в су-

шилках нового поколения. Их существенное преимущество – высокая скорость сушки, так как перегретый пар обладает значительной теплоемкостью и повышенной рабочей температурой, что обеспечивает более высокий КПД тепловой установки. При этом исключается взрыв угля из-за отсутствия кислорода при термообработке угля. К недостаткам следует отнести значительные капитальные затраты, что обусловлено изготовлением сушилок из нержавеющей стали, наличием надежных уплотнений во избежание попадания в рабочую зону воздуха и утечки перегретого пара, а также оснащение теплообменников специальными очистителями для удаления осевших в процессе конденсации пара твердых частиц. Японские специалисты разработали сушилку SHR с рекуперацией энергии [12], которая работает в замкнутом тепловом цикле в такой последовательности: предварительное нагревание влажного угля; превращение выделенной влаги в перегретый пар; сжатие перегретого пара для увеличения его температуры; сушка угля перегретым паром в кипящем слое частиц; замыкание теплового цикла за счет возврата физической теплоты перегретого пара на предварительное нагревание влажного материала.

Сравнивая с обычными тепловыми агрегатами прямого нагрева сушилку с рекуперацией теплоты и обработкой сушонка в кипящем слое, можно выделить ее преимущества (таблица).

Показатели	Сушилка	
	прямого нагрева	с рекуперацией
Производительность, т/ч	15	15
Отношение воздух/пар, т/ч	335	241
Подача воздухоудовки, тыс. м <sup>3</sup> /ч	415	290
Мощность электропривода, кВт	900	630
Тепловая мощность, МВт	15,5	9,0
Степень рекуперации тепловой мощности, МВт	0	5,5
Капитальные затраты, млн евро	1,35	2,85
Эксплуатационные затраты, млн евро	2,90	1,96



При обработке угля перегретым паром за короткое время достигается не только его обезвоживание, но и частичная десульфурация, в результате улучшаются технологические качества сушонки. Для более полного использования физической и скрытой теплоты рабочего пара сушилки интегрируются с тепловыми электростанциями, при этом за счет механической рекомпрессии пара производится электрическая энергия в количестве, по меньшей мере 0,2 кВт·ч с каждого килограмма испаренной влаги.

Перспективное направление в области сушки углей с высоким содержанием летучих – их холодное обезвоживание с помощью водоудаляющего агента типа ожиженного диметил-эфира, который имеет точку кипения – минус 24,8 °С, а давление парообразования при температуре 25 °С – 0,59 МПа, что позволяет легко очищать уголь от органического экстрактора за счет декомпрессии после завершения процесса. При этом выводится 95 % влаги. Несмотря на широкое распространение указанной технологии в других отраслях промышленности при обогащении угля она пока не нашла промышленного применения из-за высоких капитальных и эксплуатационных расходов по извлечению экстрактора.

**Выводы.** Приведенный анализ оборудования для термической сушки углей с высоким выходом летучих показал предпочтительность сушилок непрямого нагрева, а также прямого нагрева в кипящем слое ввиду их безопасности, надежности, умеренных энергозатрат и практической состоятельности. Применение перегретого пара не оправдывает себя по причине высоких капитальных и эксплуатационных затрат. Микроволновые установки не обеспечивают равномерного

нагрева сушонки, вследствие чего возрастает опасность ее возгорания и взрыва. Технология холодного глубокого обезвоживания углей посредством водоудаляющих органических экстракторов мало востребована из-за ее низкой рентабельности. Практическое применение при сушке углей с высоким выходом летучих получили паровые сушилки с кипящим слоем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Bill C. E.* Rotary steam tube dryer. *Industrial and Engineering Chemistry*. – 1938. – № 30(9). – P. 997-999.
2. *EU Patent EP 03701 / N. Akira, K. Keiichi, W. Takeshi, O. Huminobu, H. Yoshiaki, M. Katsuhisa.* Coal moisture control process. – 44. – 1988.
3. *U. S. Pat. № 5305533 / D. J. Alexander, R. A. Sindelar.* Combined direct and indirect dryer. – 1994.
4. *U. S. Patent № 7537622 / D. D. Dunlop, L. C. Kenyon.* Process of drying coal. – 2009.
5. *Groenewold H.* Drying in fluidized beds with immersed heating elements / H. Groenewold, E. Tsotsas // *Chemical engineering science*. – 2007. – № 62 (1-2). – P. 481-496.
6. *Hashimoto T.* Overview of Integrated Coal Gasification Combined-cycle Technology Using Low - rank Coal / T. Hashimoto, K. Sakamoto, Y. Yamaguchi atc. // *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. – 2011. – Vol. 48. – № 3. – P. 19-23.
7. *U. S. Patent № 7666235 / T. R. Learey, J. M. Drozd* Microwave drying of coal. – 2010.
8. *U. S. Patent № 4567340 / Latchum, J. W. J.* Apparatus and method for drying solid materials. – 1986.
9. *U. S. Patent № 4967486 / M. K. Doelling.* Microwave assisted fluidized bed processor. – 1990.
10. *Rowson N. A.* Desulphurisation of coal using low power microwave energy. *Minerals Engineering / N. A. Rowson, N. Rice/* – 1990. – № 3(3-4). – P. 1745-1747.
11. *U. S. Patent № 4249909 / A. G. Comolli.* Drying and passivating wet coals and lignite. – 1981.
12. *Novel drying process based on self - heat recuperation technology / K. Fushimi, Y. Kansha, M. Aziz, K Mochidzuki, etc. // Drying technology*. – 2011. – № 29(1). – P. 105-110.