

А.С. КИРНАРСКИЙ, д-р техн. наук
(Германия, "Инжиниринг Доберсек ГмбХ")

ТЕРМИЧЕСКАЯ СУШКА УГЛЕЙ С ВЫСОКИМ ВЫХОДОМ ЛЕТУЧИХ

Термическая 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. Такой принцип реализован в сушилках непрямого нагрева, основным конструктивным элементом которых есть барабан, снабженный рубашкой для обогрева паром или другим теплоносителем. Недостатком данного решения есть низкая эффективность сушки из-за того, что в каждый момент времени только часть просушиваемого угля контактирует с прогретой поверхностью вращающегося сушильного барабана и, как следствие, снижается скорость теплопередачи.

С целью устранения данного 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 настоящей 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 предполагает ранее упомянутые трубки используются для перемещения под действием собственной массы просушиваемого угля, в то время как теплоноситель подается в рабочую полость сушильного барабана и, тем самым, обеспечивается подвод тепла к наружной поверхности трубок. Как результат, имеет место порционная просушка угля без его переизмельчения. Диаметр трубок обычно составляет 150 мм. При сушке угольной мелочи крупностью -3 мм ее влажность снизилась с 20 до 4%. Температура на поверхности трубок была более 120 °С. Промышленные сушильные агрегаты такого типа имеют производительность по исходному углю от 95 до 420 т/час (на сухую массу) и обеспечивают влажность сушонки на уровне 4,5-8,0%. Такие установки полностью автоматизированы. Основными регуляторами процесса есть частота вращения сушильного барабана и давление пара, применяемого в качестве теплоносителя. Давление пара достигает 10 ати. Сушильный барабан производительностью 220 т/час имеет диаметр 6,5 м, а его длина – 9 м. Количество трубок – 150 шт.

Комбинированная сушка прямого и косвенного нагрева описана в патенте США [3], согласно которому сушильный агрегат (рис. 1) включает цилиндрический вращающийся сушильный барабан, который встроены в топку с горелка-

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

ми. Сушильний барабан покрит термопластинами, які на участку попереднього косвенного прогрева розміщені так, що забезпечують перемішування повітря, а на участку прямого нагріву вони служать для напрямку повітря в сушильний барабан.

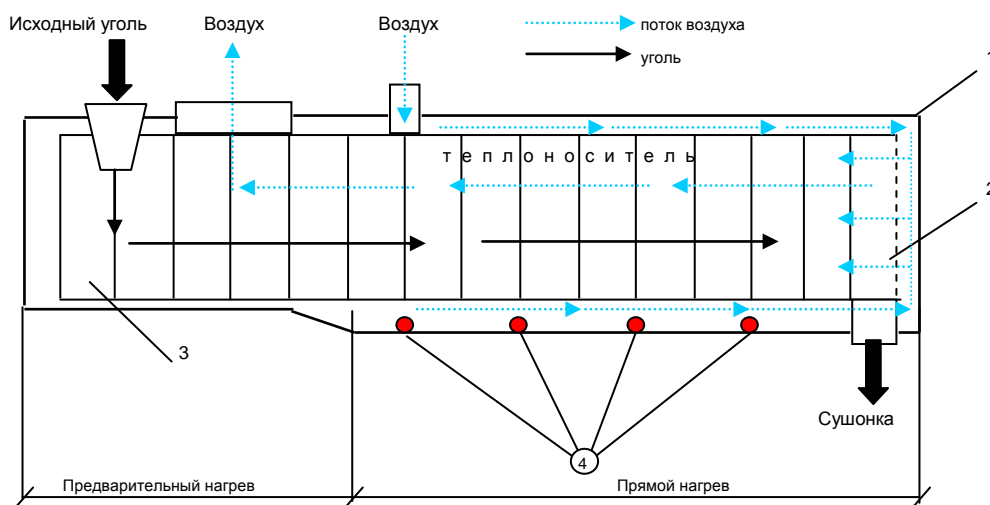


Рис. 1. Сушильний барабан з комбінованою системою нагріву:
1 – топка; 2 – сушильний барабан; 3 – термопластины; 4 – горелки

При попаданні вологого вугілля в сушильний барабан має місце непрямий його нагрів при допомозі гарячих топочних газів, які програвують зовнішню поверхню барабана. При проходженні 1/3 довжини робочої зони відбувається перехід на прямий нагрів при прямому контакті вугілля та теплоносія. Прямая теплопередача здійснюється в протилежному режимі.

Більш досконалими по швидкості масопереносу та теплопередачі є сушилки з киплячим шаром, деякі різновиди яких можуть застосовуватися при обробці вугілля з високим вмістом летучих. Однією з таких конструкцій є багаторізна сушилка з киплячим шаром. Відомо двох-стадійна сушилка [4], в якій на першій стадії вихідне вугілля крупністю – 5 мм піддається сушці в киплячому шарі при температурі 150-290 °С і швидкості повітря 1,2-2,4 м/с, а на другій стадії при температурі 290-350 °С і швидкості повітря 2,4-3,7 м/с. Основна частина вологи (40-60%) видаляється на першій стадії, в той час як на другій стадії вологість матеріалу скорочується тільки на 1%. При сушці матеріалу в киплячому шарі має місце захоп високодисперсної його фракції робочим потоком, для чого на виході передбачено пылеулавлюючий циклон. Для видалення залишкової вологи з повітряного потоку встановлюються конденсатори. Така очистка сушильного агента забезпечує його циркуляцію при умові змішування з порцією гарячого повітря перед подачею в робочу зону сушилки. В один прийом швидкість вихідного повітряного потоку становить не менше 5,5 м/с, що може порушити нормальний режим ожигання вугілля. Чим більше стадій киплячого шару, тим менше удільний витрат енергії (кДж/кг вологи), ніжні капітальні та експлуатаційні

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

ные затраты и менее строгие требования к качеству сушильного агента. Для повышения теплового к.п.д. 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 ожижаемых частиц. Так как величина коэффициентов теплопередачи зависит от гидродинамического режима, то необходимо учитывать месторасположение, форму и свойства погружных термоэлементов, а также характеристики газового потока и ожиженного слоя. Так, качество ожижения 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 таких установок типа HDC 360 была запущена в эксплуатацию в 1983 году в Германии при сушке коксующегося угля с содержанием летучих 21-24% на коксохимическом заводе в г. Боттроп (рис. 2). Производительность такого сушильного агрегата – 10 т/ч. Влажность материала на входе и выходе составила соответственно 12 и 0,1%. В качестве теплоносителя применялся насыщенный пар в условиях замкнутого парового цикла. Температура сушонки достигала 200 °С.

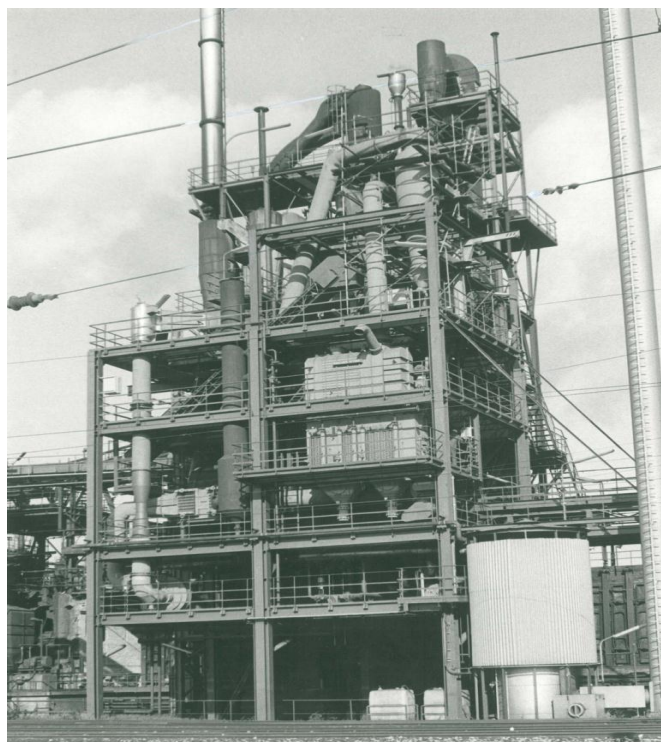


Рис. 2. Сушилка с кипящим слоем для обработки коксующегося угля

Примером современных сушильных агрегатов с кипящим слоем может быть сушилка типа HDC 9250, шесть единиц которых в настоящее время монтируются в штате Миссисипи (США) на тепловой электростанции IGCC для

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

термической обработки бурого угля влажностью 46%. Конечная влажность материала – 18%. Содержание летучих в буром угле – 19-26%.



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

Производительность сушилок типа HDC 9250 составляет 55 т/ч на сухую массу. В качестве теплоносителя служит инертный азот, который циркулирует в замкнутом контуре. Необходимое тепло получают за счет отходящих газов газификатора, при этом теплопередача осуществляется посредством горячей воды. Температура сушонки на выходе достигает 90 °С.

Все рассмотренные выше 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 [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 высокочастотной 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 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]. Эти кинетические кривые сушки показывают, что скорость процесса микроволновой сушки в значительной мере зависит от мощности поля. Так, при мощности высокочастот-

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

ного излучения 1500 Вт продолжительность сушильного цикла вдвое меньше, чем при мощности 750 Вт. Во избежание перегрева материала рабочая температура поддерживается не выше 105 °С. Нижний график (рис.4-б) показывает, что на показатели микроволновой сушки влияет также масса материала, что вызвано неравномерностью его прогрева, для чего стараются держать частицы в процессе сушки 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 чего внутренняя влага вытесняется на поверхность твердых частиц, тем самым создаются идеальные условия для последующего конвективного теплообмена.

Если же 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 Долинга [9], который предложил использовать энергию отраженных волн, причем распределительная решетка у него служит не только для перемещения материала и создания восходящего потока газового агента, но и отражения волн, энергия которых используется более эффективно, в результате чего скорость процесса термической сушки возрастает в 2-4 раза. Побочный полезный эффект при использовании микроволновых генераторов – десульфурация обрабатываемого угля, результатом чего есть разрушение пиритной серы (FeS_2) с выделением сернистых соединений типа H_2S , COS , SO_2 , а при микроволновой обработке тонкоизмельченного угля в щелочных растворах степень десульфурации составляет 70-80% без ухудшения его коксующейся способности [10]. Несмотря на перспективность микроволновой сушки угля, практическое его применение ограничено из-за значительных капитальных и эксплуатационных расходов, а также по причине возгорания угля при локальном его перегреве.

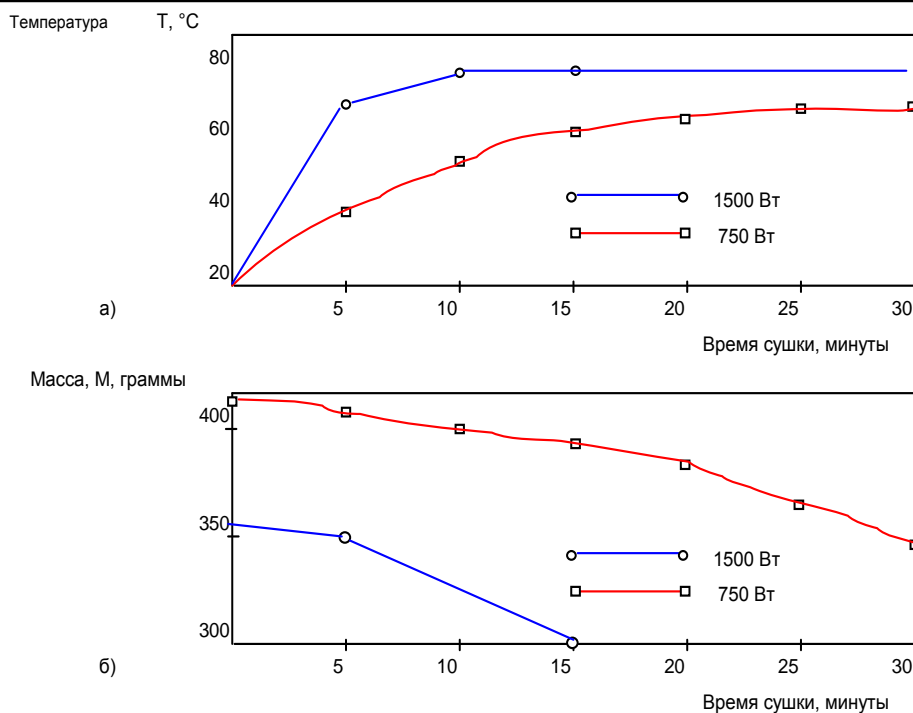


Рис. 4. Кинетические кривые сушки угля с высоким выходом летучих:

а – зависимость времени сушки от температуры нагрева;

б – зависимость времени сушки от массы обрабатываемого угля

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·м²). Для повышения теплового к.п.д. и сокращения энергозатрат увеличивают степень заполнения и рабочую температуру. Скорость сушки возрастает при ее эксплуатации на пониженном давлении среды. Типовая конструкция такой сушилки (рис. 5) включает корпус с кожухом, который прогревается посредством горячей воды или тепла, при этом удаление влаги осуществляется в несколько стадий [11]. На первой стадии уголь просушивается в открытом корпусе при температуре 80-150 °С до влажности 8-12%, после чего он поступает в отдельный герметичный барабан, где имеет место термическая сушка при температуре 90-260 °С под избыточным давлением пара 0,5 ати, а затем на заключительной фазе сушонка охлаждается и разрушается в бункер. Изменение интенсивности прогрева с быстрой на медленную при двухступенчатом переходе обеспечивает смещение низколетучих углеводородов к поверхности угольных зерен и, как следствие, купируются поры и сводится к минимуму повторная адсорбция жидкой фазы.

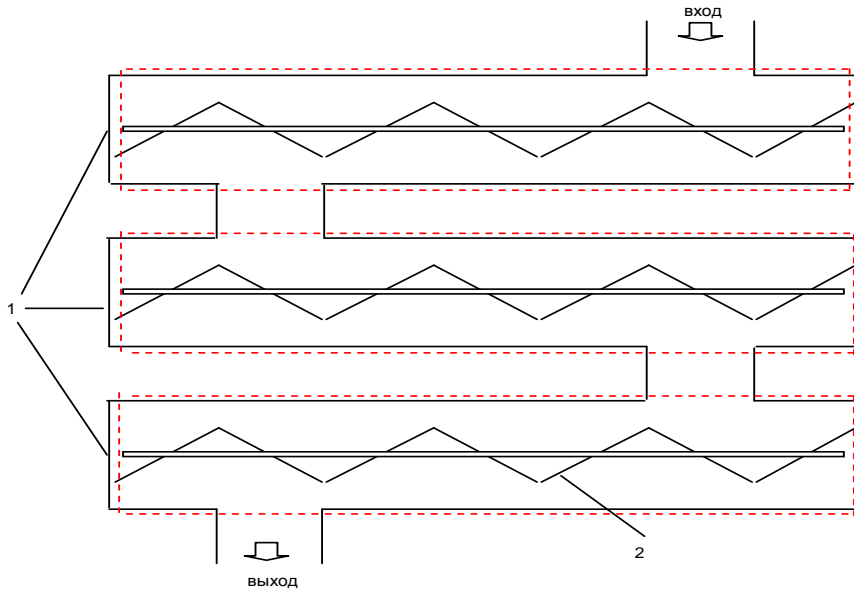


Рис. 5. Трехстадийная сушилка на основе винтового конвейера:
1 – кожух; 2 – винтовой конвейер

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

Принципиально другой подход – применение сушилок прямого нагрева, в которых сушильным агентом есть перегретый пар (SSD). В принципе, обычная сушилка прямого нагрева может быть переведена в режим SSD-установки. Давно известно, что в качестве теплоносителя предпочтительнее применять перегретый пар, но только в последнее время этот подход получает практическое воплощение в сушилках нового поколения. Существенным их преимуществом является высокая скорость сушки, так как перегретый пар обладает значительной теплоемкостью и повышенной рабочей температурой, что обеспечивает более высокий к.п.д. тепловой установки, при этом исключается взрыв угля из-за отсутствия кислорода при термообработке угля. К их 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. Японскими специалистами разработана сушилка 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;

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

- сушка угля перегретим паром в кипящем слое частиц;
- замыкание теплового цикла за счет возврата физической теплоты перегретого пара на предварительное нагревание влажного материала.

По сравнению с обычными тепловыми агрегатами прямого нагрева сушилка с рекуперацией теплоты и обработкой сушонки в кипящем слое имеет ряд преимуществ, которые приведены в таблице.

Показатели сушилок	Сушилка прямого нагрева	Сушилка с рекуперацией
Производительность, т/ч	15	15
Отношение воздух : пар, т/ч	335	241
Подача воздухоудовки, тыс. м ³ /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, результатом чего есть улучшение технологических качеств 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 – холодное их обезвоживание посредством водоудаляющего агента типа охлажденного диметилэфира (ОДЭ), который имеет точку кипения – минус 24,8 °С, а давление парообразования при температуре 25,0°С – 0,59 МПа, что позволяет легко очищать уголь от данного органического экстрактора за счет декомпрессии по завершению процесса, при этом выводится 95% влаги. Несмотря на широкое распространение этой 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

1. 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.

2. Применение перегретого пара не оправдывает себя по причине высоких капитальных и эксплуатационных затрат.

3. Микроволновые установки не обеспечивают равномерного нагрева сушонки, в результате чего возрастает опасность ее возгорания и взрыва.

4. Технология холодного глубокого обезвоживания углей посредством во-

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

доудаляющих органических экстракторов маловостребованна из-за низкой ее рентабельности.

5. Практическое применение при сушке углей с высоким выходом летучих получили паровые сушилки с кипящим слоем.

Список литературы

1. Bill, C.E. Rotary steam tube dryer // Industrial and Engineering Chemistry. – 1938. – № 30(9). – P. 997-999.
2. Akira, N., Keiichi, K., Takeshi, W., Huminobu, O., Yoshiaki, H., Katsuhisa, M. Coal moisture control process. EU Patent EP 0370144. – 1988.
3. Alexander, D.J., Sindelar, R.A. Combined direct and indirect dryer. U.S. Patent № 5305533. – 1994.
4. Dunlop, D.D., Kenyon, L.C. Process of drying coal. U.S. Patent № 7537622. – 2009.
5. Groenewold, H., Tsotsas, E. Drying in fluidized beds with immersed heating elements // Chemical engineering science. – 2007. – № 62 (1-2). – P. 481-496.
6. Hashimoto, T., Sakamoto, K., Yamaguchi, Y., Oura, K., Arima, K., Suzuki, T. Overview of Integrated Coal Gasification Combined-cycle Technology Using Low – rank Coal // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – 2011. – Vol. 48. – № 3. – P. 19-23.
7. Learey, T.R., Drozd, J.M. Microwave drying of coal. U.S. Patent № 7666235. – 2010.
8. Latchum, J.W.J. Apparatus and method for drying solid materials. U.S. Patent № 4567340. – 1986.
9. Doelling, M.K. Microwave assisted fluidized bed processor. U.S. Patent № 4967486. – 1990.
10. Rowson, N.A., Rice, N. Desulphurisation of coal using low power microwave energy. // Minerals Engineering. – 1990. – № 3(3-4). – P. 1745-1747.
11. Comolli, A.G. Drying and passivating wet coals and lignite. U.S. Patent № 4249909. – 1981.
12. Fushimi, K., Kansha, Y., Aziz, M., Mochidzuki, K., Tsutsumi, A., Matsumoto, K., Yokohama, K., Kawamoto, N. Novel drying process based on self – heat recuperation technology // Drying technology. – 2011. – № 29(1). – P. 105-110.

© Кирнарский А.С., 2013

*Надійшла до редколегії 18.07.2013 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*