

СУШКА ЗОЛЫ ТЭЦ В МНОГОСЕКЦИОННОЙ СУШИЛКЕ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

© 2017

С.В. Натарева, доктор технических наук,

профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств»

Т.Е. Никифорова, доктор химических наук,

доцент кафедры «Технология пищевых продуктов и биотехнология»

Р.Е. Голяков, магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств»**А.А. Сироткин**, магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств»*Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново (Россия)*

Ключевые слова: кипящий слой; сушка золы ТЭЦ; многосекционная сушилка кипящего слоя.

Аннотация: В материалах статьи приведен анализ исследований по энергосбережению и интенсификации процесса сушки. Указаны достоинства и недостатки различных способов сушки в кипящем слое. Установлены различные технико-технологические методы, позволяющие снизить энергопотребление процесса и интенсифицировать сушку влажных материалов. В статье приведены данные по экспериментальному исследованию процесса сушки золы ТЭЦ в многосекционной сушилке кипящего слоя. Исследования проводили в лабораторной установке. Лабораторная сушилка имела следующие размеры: высота аппарата – 0,6 м; диаметр газораспределительной решетки – 0,08 м; конусность корпуса – 14°. Аппарат был разделен на секции вертикальными перегородками. Аппарат имел одну, две, три и четыре секции. Переход дисперсного материала из одной секции в другую осуществлялся с помощью переточного устройства. Приведены зависимости влажности высушенного материала от температуры сушильного агента. Показано, что увеличение температуры горячего воздуха снижает влажность продукта. Приведены зависимости влажности высушенного материала от количества секций в аппарате. Показано, что увеличение секций в аппарате снижает влажность продукта. Приведены кривые распределения конечных значений влагосодержания золы ТЭЦ и воздуха по секциям четырехсекционного аппарата. Приведены кривые распределения температуры воздуха по высоте секций аппарата.

Проведенные исследования процессов сушки золы ТЭЦ показали, что многосекционный аппарат является более эффективным по сравнению с односекционным аппаратом. Влажность высушенной золы ТЭЦ в многосекционном аппарате в 1,7 раза меньше, чем в односекционном аппарате. Многосекционная сушилка может работать с рециркуляцией отработанных сушильных газов. Объем рециркуляционного воздуха составляет 25 % от общего расхода воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

В химической промышленности сушка, наряду с выпариванием и обжигом, как правило, определяет технико-экономические показатели всего производства в целом, что связано со значительными затратами тепловой энергии для проведения данных процессов [1; 2]. Перспективы развития в области сушки влажных материалов определяются необходимостью разработки новых эффективных способов сушки, создания высокопроизводительного сушильного оборудования, совершенствования работы существующих сушилок, что будет способствовать рациональному использованию природных ресурсов, снижению себестоимости готовой продукции и повышению конкурентоспособности производства [3; 4]. Экономия тепловой энергии в процессе сушки может быть достигнута путем снижения температуры уходящих газов за счет установки дополнительных воздухоподогревателей и подсушки исходного материала, ведения оптимальных режимов горения топлива, устранения подсосов холодного воздуха в сушилку, повышения интенсивности влагоотдачи, частичной рециркуляции отработанного воздуха и другими способами [5; 6]. При этом решение задачи сокращения затрат тепловой энергии целесообразно рассматривать вместе с вопросами экономики, управления сушильной установкой и качества высушенного материала [7; 8].

Для сушки дисперсных материалов успешно используются сушилки с кипящим слоем, неоспоримыми преимуществами которых по сравнению с другими сушил-

ками являются развитая поверхность контакта между частицами и сушильным агентом и интенсивное испарение влаги из материала [9; 10]. Наблюдаемая при этом значительная неравномерность сушки, обусловленная тем, что при интенсивном перемешивании в слое время пребывания отдельных частиц существенно отличается от его средней величины, может быть устранена путем секционирования сплошного кипящего слоя [11; 12]. Секционирование кипящего слоя может осуществляться горизонтальными тарелками, расположенными по высоте аппарата, и вертикальными перегородками [13; 14]. В обоих случаях предъявляются высокие требования к надежности переточных устройств, с помощью которых зернистый материал непрерывно переходит из одной секции в другую [15; 16]. Создание и внедрение в промышленное производство аппаратов такой конструкции, позволяющих повысить эффективность процесса сушки и снизить удельные затраты тепловой энергии на единицу выпускаемой продукции, является актуальной задачей [17; 18]. Цель данной работы – исследование процесса сушки дисперсных материалов в многокамерной сушилке с кипящим слоем, секционированной вертикальными перегородками.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс сушки дисперсных материалов проводили в лабораторной установке, основным элементом которой являлась многосекционная сушилка кипящего слоя (рис. 1).

Аппарат включает коническую камеру для кипящего дисперсного материала 1, камеру для ввода горячего воздуха 2 и камеру для разделения твердой и газовой фаз 3. В нижней части камеры 1 расположена газораспределительная решетка 4. В камерах 1 и 2 установлены вертикальные перегородки 5 и 6 соответственно, которые симметричны относительно друг друга и делят аппарат на четыре одинаковые секции. В каждой секции камеры для кипящего дисперсного материала 1, кроме последней, имеются переточные устройства, представляющие собой инжектирующую трубку 7, переточное отверстие 8, просверленное в вертикальной перегородке 5, и карман 9, расположенный под инжектирующей трубкой 7. Высота расположения переточного отверстия 8 в перегородке 5 над газораспределительной решеткой 3 определяет высоту кипящего слоя в камере 1. Инжектирующая трубка 7 соединена гибкой трубкой со штуцером 10 для ввода отработанного воздуха. Каждая секция в камере 2 имеет штуцеры для ввода сушильного агента 11. Первая секция для кипящего дисперсного материала по ходу его движения снабжена штуцером для ввода влажного материала 12, а последняя секция – штуцером для вывода высушенного материала 13. В верхней части аппарата расположен штуцер для вывода отработанного воздуха 14.

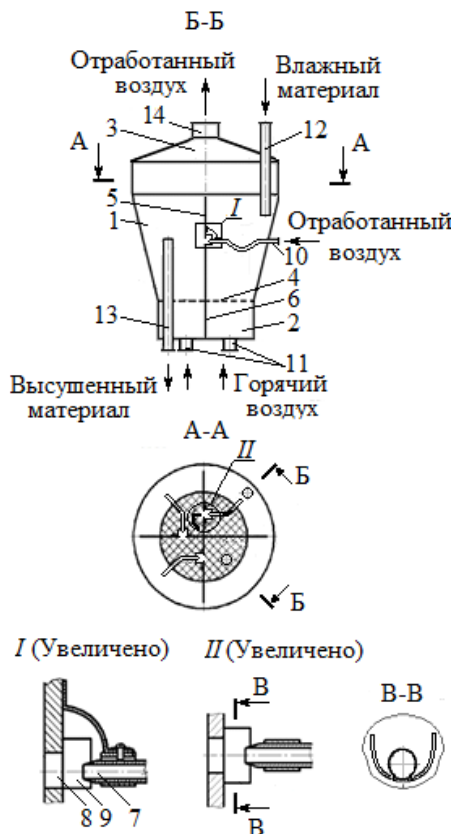


Рис. 1. Многосекционный аппарат кипящего слоя

Аппарат работает следующим образом. В первую секцию по ходу движения материала камеры для кипящего дисперсного материала 1 с помощью штуцера 12 подается влажный материал. Горячий воздух подается в нижнюю часть сушилки во все секции аппарата через

штуцеры 11, проходит через отверстия газораспределительной решетки 4 и поддерживает над ней материал в кипящем состоянии. Частично высушенный материал в первой секции попадает в переточный карман 9 и переходит во вторую секцию через переточное отверстие 8 с помощью инжектирующей трубки 7, в которую подается часть отработанного воздуха. Аналогичным образом работают переточные устройства во второй и третьей секциях. Высушенный материал удаляется из последней секции камеры для кипящего дисперсного материала 1 через штуцер 13. В верхней части аппарата через штуцер 14 удаляется отработанный воздух, часть которого возвращается обратно в аппарат через штуцеры 10.

Сушилка была изготовлена из металла, теплоизолирована листовым асбестом толщиной 10 мм и имела следующие размеры: высота аппарата – 0,6 м; диаметр газораспределительной решетки – 0,08 м; конусность корпуса – 14°. При установке определенного количества вертикальных перегородок аппарат мог иметь две, три или четыре секции. Без вертикальных перегородок аппарат представлял собой односекционную сушилку.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была выбрана зола ТЭЦ. Средний размер частиц золы составлял $5 \cdot 10^{-4}$ м. Эксперименты проводили с различным количеством вертикальных перегородок и без них при следующих условиях: производительность сушилки по абсолютно сухому материалу $G_{с.м}$ принималась $7 \cdot 10^{-4}$ кг/с; производительность сушилки по воздуху $L = 0,011$ м³/с; влагосодержание золы ТЭЦ на входе в аппарат $u_{вх} = 0,17$ кг/кг; температура золы на входе в аппарат $\theta_{вх} = 18$ °С; влагосодержание воздуха на входе в аппарат $x_{вх} = 0,0092$ кг/кг; высота кипящего слоя $h_{к.сл} = 0,05$ м; порозность кипящего слоя над газораспределительной решеткой $\epsilon = 0,6$; температура теплоносителя на входе в аппарат $t_{г.вх}$ составляла 70, 75, 80, 85 и 90 °С.

При проведении опытов в местах выхода материала из секции отбирали навески золы и определяли ее влагосодержание на основании данных измерения масс влажного и высушенного материала с помощью аналитических весов. Также измеряли температуру воздуха по высоте кипящего слоя в каждой секции аппарата. Контроль температуры воздуха проводили с помощью хромель-копелевых термопар, подключенных к электронному автоматическому потенциометру КСП-4. Все измерения проводили после выхода аппарата на стационарный режим, который устанавливался, как правило, через 2 часа. Из уравнения материального баланса по влаге находили влагосодержание воздуха на выходе из каждой секции аппарата [19; 20]:

$$x_{\text{вых},i} = x_{\text{вх}} + \frac{G_{\text{с.м}}(u_{\text{вх},i} - u_{\text{вых},i})}{L},$$

где i – номер секции, по ходу движения материала, $i=1 \div 4$;

$x_{\text{вых},i}$ – влагосодержание воздуха, выходящего из i -й секции, кг/кг;

$u_{\text{вх},i}$, $u_{\text{вых},i}$ – влагосодержание материала на входе в i -ю секцию и выходе из нее соответственно, кг/кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований показаны на рис. 2–5.

На рис. 2 представлены зависимости изменения влагосодержания золы ТЭЦ, выходящей из аппарата, от температуры воздуха, поступающего на сушку, при различном количестве секций. Из рисунка видно, что с повышением температуры воздуха от 70 до 90 °С влагосодержание высушенного материала уменьшается в среднем в 1,6 раза. Увеличение количества секций в аппарате приводит к снижению конечной влажности материала. Например, при подаче на сушку горячего воздуха с температурой 90 °С конечное влагосодержание золы в четырехсекционном аппарате в 1,7 раза меньше, чем в односекционном аппарате. Из анализа кривой распределения конечного влагосодержания золы по секциям четырехсекционного аппарата, приведенной на рис. 3, следует, что 60 % влаги удаляется из материала в первой секции, а в последней секции – только 5 %. Очевидно, что влагосодержание отработанного воздуха в первой секции будет значительно больше, чем в четвертой.

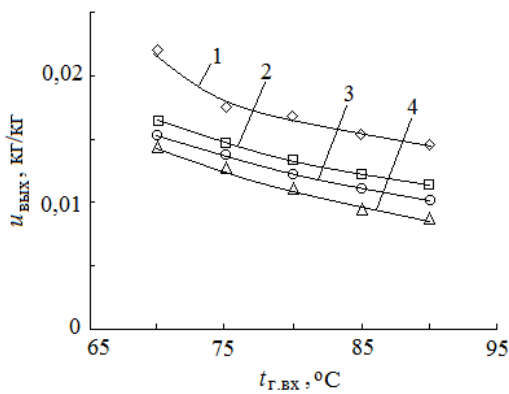


Рис. 2. Зависимости изменения конечного влагосодержания золы ТЭЦ от температуры воздуха на входе в аппарат при различном количестве секций: 1, 2, 3, 4 – одно-, двух-, трех- и четырехсекционный аппарат соответственно

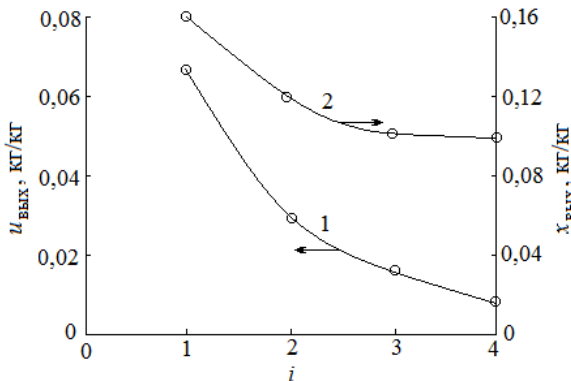


Рис. 3. Кривые распределения конечных значений влагосодержания золы ТЭЦ (1) и воздуха (2) по секциям четырехсекционного аппарата: $t_{г.вх} = 90\text{ }^\circ\text{C}$

На рис. 4 и 5 показаны кривые распределения температуры воздуха по высоте односекционного аппарата и по высоте каждой секции четырехсекционного аппарата соответственно при температуре воздуха на входе в аппарат 90 °С. Из данных рисунков видно, что температура сушильного агента уменьшается по высоте аппарата. Воздух, выходящий из односекционного аппарата, имеет низкую температуру и высокое влагосодержание, что затрудняет повторное его использование для сушки влажного материала. Анализ зависимостей $t_{г.} = f(h_{к.сл.})$, полученных в четырехсекционном аппарате (рис. 5), показывает, что температура выходящего из первой секции воздуха значительно меньше, чем в остальных секциях аппарата. Это также свидетельствует о том, что влага в основном удаляется из материала в первой секции.

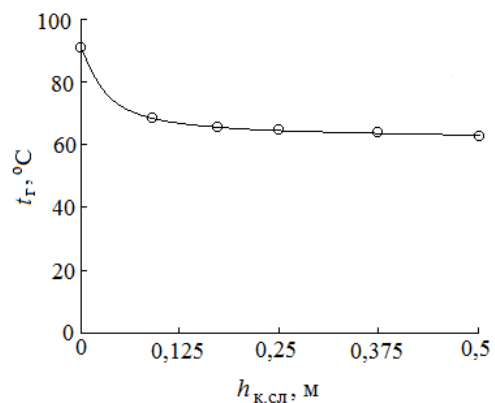


Рис. 4. Кривая распределения температуры воздуха по высоте односекционного аппарата

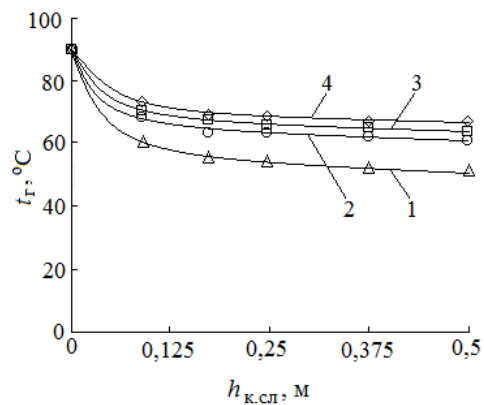


Рис. 5. Кривые распределения температуры воздуха по высоте секций четырехсекционного аппарата: 1 – секция 1; 2 – секция 2; 3 – секция 3; 4 – секция 4

Таким образом, в многосекционной сушилке температура отработанного воздуха увеличивается, а его влагосодержание уменьшается от одной секции к другой по ходу движения материала. Например, в последней секции четырехсекционной сушилки температура воздуха при прохождении сквозь кипящий слой влажного материала снизилась от 90 до 72 °С, а его влагосодержание

увеличилось с 0,0092 до 0,0097 кг/кг. Следовательно, отработанный воздух из четвертой секции аппарата, объемный расход которого составляет 25 % от общего расхода сушильного агента, целесообразно использовать обратно для проведения процесса сушки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенные исследования процессов сушки золы ТЭЦ показали, что многосекционный аппарат является более эффективным по сравнению с односекционным аппаратом. Применение секционирования кипящего слоя вертикальными перегородками позволяет повысить равномерность сушки материала и уменьшить его конечную влажность. При этом отработанный сушильный агент из последних секций четырехсекционного аппарата рекомендуется направить обратно для проведения процесса сушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов О.Л., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. М.: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.
2. Натареев С.В., Иванов В.Е., Казаков Д.С. Проблемы интенсификации процессов сушки дисперсных материалов // Теоретические основы создания, оптимизации и управления энерго- и ресурсосберегающими процессами и оборудованием: сб. трудов междунар. науч. конф. Т. 2. Иваново, 2007. С. 55.
3. Данилов О.Л. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М.: Московский энергетический институт (технический университет), 2010. 226 с.
4. Гаряев А.Б. Применение утилизаторов теплоты и тепловых насосов для экономии энергии при сушке материалов // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Курск, 2015. С. 343–346.
5. Голицын В.П., Голицына Н.В. Сравнительная оценка энергозатрат на сушку пиломатериала в сушильном оборудовании различного типа и способа сушки // Лесной эксперт. 2004. № 16. С. 18–25.
6. Орлов А.Ю., Суворова Ю.А. Энергосбережение в процессах сушки с вихревой трубой // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 4. С. 832–836.
7. Коновалов В.И., Кудра Т., Колиух А.Н., Романова Е.В. Современное оборудование для комбинированной кондуктивно-конвективной сушки и термообработки // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2008. Том 14. № 3. С. 579–583.
8. Рашковская Н.Б. Сушка в химической промышленности. Л.: Химия, 1977. 80 с.
9. Расчеты аппаратов кипящего слоя / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. Л.: Химия, 1986. 352 с.
10. Кунилова Т.М. Анализ существующих типов оборудования и технологий сушки // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2008. № 1. С. 28–36.
11. Kudra T., Mujumdar A.S. Advanced drying technologies. New York; Basel: Marcel Dekker Inc., 2002. 472 p.

12. Van't Land C. Drying in the Process Industry. USA: Wiley, 2011. 400 p.
13. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. Л.: Химия, 1979. 272 с.
14. Каганович Ю.Я., Злобинский А.Г. Промышленные установки для сушки в кипящем слое. Л.: Химия, 1970. 176 с.
15. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. 352 с.
16. Сажин Б.С., Чувпило Е.А. Типовые сушилки со взвешенным слоем материала. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. 147 с.
17. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.
18. Сажин Б.С., Сажин В.Б., Отрубянников Е.В., Кочетов Л.М. Сушка в активных гидродинамических режимах // Теоретические основы химической технологии. 2008. Т. 42. № 6. С. 638–653.
19. Муштаев В.И., Тимонин А.С., Лебедев В.Я. Конструирование и расчет аппаратов с взвешенным слоем. М.: Химия, 1991. 344 с.
20. Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск: Беларус. навука, 2010. 443 с.

REFERENCES

1. Danilov O.L., Leonchik B.I. *Ekonomiya energii pri teplovoj sushke* [Energy savings in heat drying]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 136 p.
2. Natareev S.V., Ivanov V.E., Kazakov D.S. Problems of intensification of drying processes of dispersed materials. *Sbornik trudov mezhdunar. nauch. konf. "Teoreticheskie osnovy sozdaniya, optimizatsii i upravleniya energo- i resursozbergayushchimi protsessami i oborudovaniem"*. Ivanovo, 2007, vol. 2, p. 55.
3. Danilov O.L. *Energoberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiyakh* [Energy saving in heat power engineering and heat engineering]. Moscow, Moskovskiy energeticheskiy institut (tekhnicheskiy universitet) Publ., 2010. 226 p.
4. Garyaev A.B. The use of waste heat and heat pumps to save energy when drying materials. *Sbornik nauch. statey "Aktualnye problemy sushki i termovlazhnostnoy obrabotki materialov v razlichnykh otraslyakh promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse"*. Kursk, 2015, pp. 343–346.
5. Golitsyn V.P., Golitsyna N.V. Comparative assessment of energy consumption for drying lumber in the drying equipment of different type and method of drying. *Lesnoy ekspert*, 2004, no. 16, pp. 18–25.
6. Orlov A.Yu., Suvorova Yu.A. Energy saving in vortex tubes drying process. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 832–836.
7. Konovalov V.I., Kudra T., Koliukh A.N., Romanova E.V. Modern equipment for combined conductive convective drying and thermal processing. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 579–583.
8. Rashkovskaya N.B. *Sushka v khimicheskoy promyshlennosti* [Drying in chemical industry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1977. 80 p.

9. Mukhlenov I.P., Sazhin B.S., Frolov V.F., eds. *Raschety apparatov kipyashchego sloya* [Calculations of fluidized bed devices]. Leningrad, Khimiya Publ., 1986. 352 p.
10. Kuniilova T.M. Analysis of existing types of equipment and drying technologies. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*, 2008, no. 1, pp. 28–36.
11. Kudra T., Mujumdar A.S. *Advanced drying technologies*. New York, Basel, Marcel Dekker Inc., 2002. 472 p.
12. Van't Land C. *Drying in the Process Industry*. Wiley, 2011. 400 p.
13. Romankov P.G., Rashkovskaya N.B. *Sushka vo vzveshennom sostoyanii* [Drying in the fluidized state]. Leningrad, Khimiya Publ., 1979. 272 p.
14. Kaganovich Yu.Ya., Zlobinsky A.G. *Promyshlennyye ustanovki dlya sushki v kipyashchem sloe* [Industrial installations for drying in fluidized bed]. Leningrad, Khimiya Publ., 1970. 176 p.
15. Mushtaev V.I., Ulyanov V.M. *Sushka dispersnykh materialov* [Drying of dispersed materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 352 p.
16. Sazhin B.S., Chuvpilo E.A. *Tipovyye sushilki so vzveshennym sloem materiala* [Typical dryers with a suspended layer of material]. Moscow, TsINTIkhimneftemash Publ., 1975. 147 p.
17. Sazhin B.S. *Osnovy tekhniki sushki* [Basics of drying technique]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 320 p.
18. Sazhin B.S., Otrubjannikov E.V., Kochetov L.M., Sazhin V.B. Drying in active hydrodynamic regimes. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2008, vol. 42, no. 6, pp. 837–851.
19. Mushtaev V.I., Timonin A.S., Lebedev V.Ya. *Konstruirovaniye i raschet apparatov so vzveshennym sloem* [Design and calculation of suspended-bed apparatus]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 344 p.
20. Akulich P.V. *Raschety sushilnykh i teploobmennyykh ustanovok* [Calculations of drying and heat transfer devices]. Minsk, Belarus. navuka Publ, 2010. 443 p.

DRYING OF ASH FROM COMBINED HEAT AND POWER PLANT (CHPP) IN THE MULTICHAMBER FLUIDIZED BED DRYER

© 2017

S.V. Natareev, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair “Machines and devices of chemical industry”
T.E. Nikiforova, Doctor of Sciences (Chemistry), assistant professor of Chair “Food technology and biotechnology”
R.E. Golyakov, graduate student of Chair “Machines and devices of chemical industry”
A.A. Sirotkin, graduate student of Chair “Machines and devices of chemical industry”
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo (Russia)

Keywords: fluidized bed; drying of ash from CHPP; multichamber fluidized bed dryer.

Abstract: The paper gives the analysis of the experimental study of the energy saving and the drying process intensification and specifies the advantages and disadvantages of various methods of drying in a fluidized bed. The authors determine various technological and manufacturing methods allowing reducing the energy consumption of the process and intensifying the drying of wet materials. The paper presents the data on the experimental study of the process of drying the ash from CHPP in the multi-chamber fluidized bed dryer. The study was carried out in the laboratory-scale plant. The laboratory dryer had the following dimensions: the device height was 0.6 m, the diameter of gas distribution grid was 0.08 m, and the body frame taper was 14°. The device was split into sections by vertical baffles and it had one, two, three and four sections. The disperse material passed from one section to another using the overflow device. The authors give the dependencies of dried material moisture content on the temperature of drying agent. The study showed that the increase of hot air temperature decreases the product moisture content. The paper presents the dependencies of the dried material moisture content on the number of sections in the device. It is shown that the expansion in the number of sections in the device decreases the moisture content of the product. The authors give the distribution curves of final values of the moisture content of ash from CHPP and air by the sections of the four-section device and the distribution curves of the temperature of air along the height of sections of the device. The study of the processes of drying ash from CHPP showed that the multi-section device is more effective in comparison with the one-section device. The moisture content of dried ash from CHPP is 1.7 times less in the multi-section device than in the one-section device. The multi-section dryer can work with the recycling of exhausted drying gasses. The recirculation air volume is 25 % of total air consumption.