

УДК 66.047.12

Кодылев А.В. – инженер

E-mail: alexey.kodylev@bosh-buderus.ru

ООО «Будерус Отопительная Техника»

Адрес организации: 421001, Россия, г. Казань, ул. Чистопольская, д. 1

Лозинов А.Н. – аспирант

E-mail: a.lozinov@mail.ru

Садыков Р.А. – доктор технических наук, профессор

E-mail: sadykov_r_a@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Кинетика конвективной сушки сыпучих и дисперсных строительных материалов в сушильной установке с рекуперацией теплоносителя

Аннотация

В производстве большинства строительных материалов используется конвективный способ сушки в потоке горячего воздуха, который используется как сушильный агент, предварительно нагретый в паровом, электрическом калорифере или рекуперационном теплообменнике. В ряде производств, в качестве сушильного агента, используются продукты сгорания топлива, разбавленные воздухом до необходимой температуры.

В работе проведены экспериментальные исследования кинетики сушки строительного песка и древесных (сосновых) опилок, выполнены необходимые расчеты процесса, оценена целесообразность использования рекуперативной конвективной сушки строительных материалов, построены соответствующие графические зависимости кинетики их сушки, показывающие энергоэффективность предлагаемого способа сушки.

Ключевые слова: рекуперация, теплота, энергосбережение, сушка, материал, конвекция.

Актуальность

В виду длительности процессов естественной сушки в промышленности применяется в основном искусственная сушка материалов в специальных сушильных установках [1-3].

Конкретный способ сушки определяется требованиями к качеству готового продукта, его термо- и ксеролабильностью, относительной влажностью теплоносителя и окружающей среды [4].

Основным параметром, определяющим окончания процесса конвективной сушки, является задаваемая технологами конечная влажность продукта. Однако, точных промышленных влагомеров, работающих в потоке конвективного теплоносителя, в настоящее время мало. Поэтому для оптимального управления процессом сушки, в качестве регулируемых, используются косвенные параметры: относительная влажность и температура сушильного агента, выходящего из сушилки; влажность и температура высушенного продукта, а регулирующим воздействием является количество подводимого тепла (температура, влажность и расход теплоносителя) [5].

Анализ существующего рынка сушильных камер показал, что среди предлагаемых камер 90-95 % классического типа – это конвективные сушильные установки [6]. Их основные преимущества: малые капитальные затраты, достаточная простота сушильного процесса, удобство технического обслуживания.

Основными элементами таких сушилок являются: циркуляционное оборудование (газодувки, вентиляторы), система нагрева (калориферы), система управления (регуляторы) [7].

При росте цен на энергоносители возникает вопрос не только об эффективности процесса высушивания материала, но и учете эксплуатационных затрат. Весь процесс удаления влаги должен мониториться с помощью информационных технологий, что позволит поддерживать оптимальный режим сушки (сведет к минимуму температурные

колебания, как по материалу, так и по теплоносителю, и в итоге приведёт к энергоресурсосбережению) [8, 9].

В этой связи была поставлена задача по усовершенствованию экспериментальной конвективной сушильной установки с подключением ее основных контролируемых параметров к персональному компьютеру и выбору рационального режима процесса сушки исследуемых строительных материалов (строительный песок, опилки для производства орбалита, ряда пористых теплоизоляционных материалов на основе базальта и др.) [10, 11].

Результаты экспериментальных исследований процесса сушки по удалению влаги из рассматриваемых материалов частично представлены в нижеследующих таблицах и графиках.

Таблица 1

Строительный песок (при расходе воздуха 14,4 м³/час (50Гц))

| Время | t1 | t2 | t3 | t4 | P1 | P2 | φ1 | φ2 |
|-------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|
| 1 | 75,3 | 40 | 47,6 | 36,1 | 29,2 | 5 | 2,5 | 15,4 |
| 2 | 75,6 | 50,6 | 49,4 | 37,1 | 29,1 | 5 | 2,5 | 12,1 |
| 3 | 75,5 | 62,8 | 50,9 | 35,5 | 28,9 | 5,1 | 2,5 | 9,5 |
| 4 | 75,5 | 68 | 51,9 | 34,4 | 29 | 4,9 | 2,2 | 7,7 |
| 5 | 75,5 | 70,4 | 53,1 | 33,5 | 28,8 | 5 | 2 | 6,3 |
| 6 | 75,6 | 71,8 | 53,8 | 33,2 | 28,8 | 5 | 1,8 | 5,4 |
| 7 | 75,8 | 72,8 | 54,6 | 33 | 28,8 | 5 | 1,7 | 4,7 |
| 8 | 76,1 | 73,6 | 55,2 | 33 | 29 | 5,1 | 1,7 | 4 |
| 9 | 76,1 | 74 | 55,9 | 33,2 | 28,9 | 5,2 | 1,6 | 3,6 |
| 10 | 76,3 | 74,6 | 56,4 | 33,1 | 28,8 | 5,3 | 1,6 | 3,2 |
| 11 | 76,4 | 74,9 | 56,6 | 33,4 | 28,9 | 5,4 | 1,5 | 3 |
| 12 | 76,7 | 75,4 | 57,3 | 33,4 | 29,1 | 5,5 | 1,5 | 2,8 |
| 13 | 76,8 | 75,8 | 58 | 33,6 | 29 | 5,6 | 1,4 | 2,6 |
| 14 | 77 | 76,1 | 58,2 | 33,4 | 29 | 5,6 | 1,4 | 2,4 |
| 15 | 77,3 | 76,2 | 58,3 | 33,4 | 29 | 5,6 | 1,4 | 2,4 |

Примечание: t1 – температура теплоносителя на входе в сушильную камеру, °С; t2 – температура высушиваемого материала, °С; t3 – температура в камере сушки, °С; t4 – температура теплоносителя на выходе из сушильной камеры °С; P1 – давление на входе в камеру сушки, Па; P2 – давление на выходе из камеры сушки, Па; φ1 – относительная влажность теплоносителя на входе в камеру сушки, %; φ2 – относительная влажность теплоносителя на выходе из камеры сушки, %.

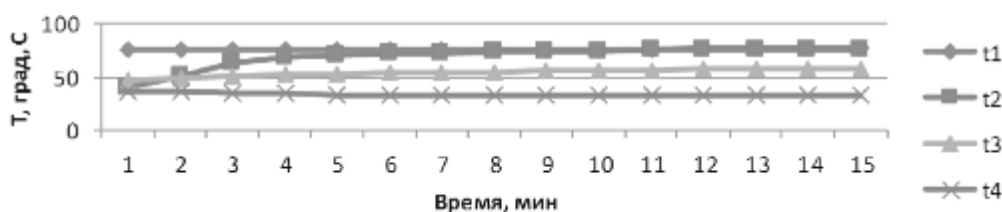


Рис. 1. Кинетика изменения температур

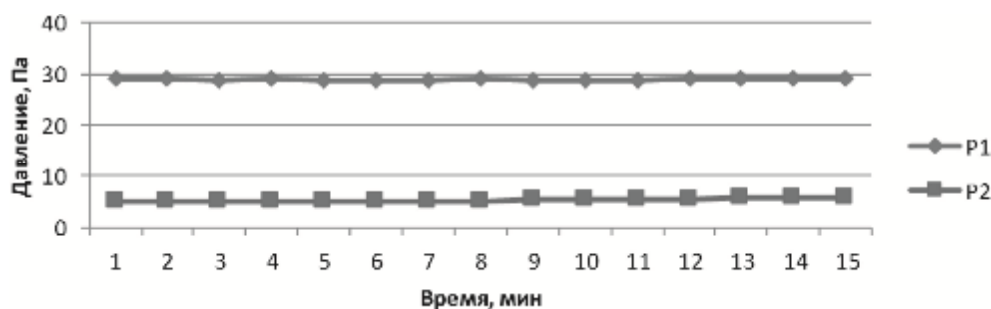


Рис. 2. Кинетика изменения давлений

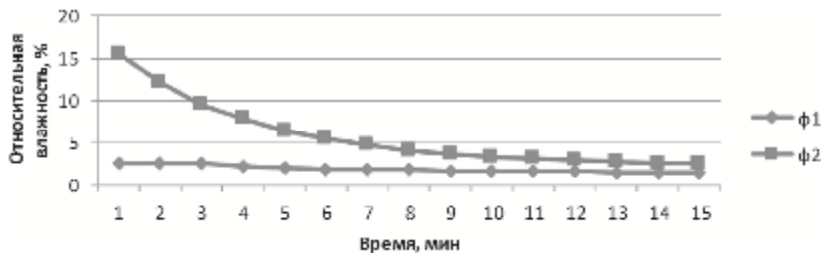


Рис. 3. Кинетика изменения влажности теплоносителя

Таблица 2

Строительный песок (при расходе воздуха 7,2 м³/час (25Гц))

| Время | t1 | t2 | t3 | t4 | P1 | P2 | ф1 | ф2 |
|-------|-------|-------|------|------|------|-----|-----|-----|
| 1 | 98,4 | 48,5 | 50,8 | 50,2 | 7,4 | 1,4 | 1,3 | 5 |
| 2 | 100,4 | 82,2 | 51,1 | 44,2 | 10,3 | 1,4 | 1,2 | 8,6 |
| 3 | 100,4 | 88,1 | 50,9 | 44,2 | 10,3 | 1,4 | 1,1 | 8,3 |
| 4 | 100,6 | 90,7 | 52,2 | 44,3 | 10,4 | 1,2 | 1 | 7,4 |
| 5 | 100,7 | 92,2 | 53,5 | 44,9 | 10,4 | 1,3 | 1 | 6,3 |
| 6 | 101,1 | 93,6 | 54,9 | 45,6 | 10,5 | 1,2 | 1 | 5,4 |
| 7 | 101,1 | 94,5 | 55,9 | 45,8 | 10,5 | 1,2 | 0,9 | 4,8 |
| 8 | 101,3 | 96,1 | 55,8 | 46,2 | 10,6 | 1,2 | 0,9 | 4,2 |
| 9 | 101,5 | 97,3 | 56,6 | 46,6 | 10,6 | 1,2 | 0,9 | 3,8 |
| 10 | 101,4 | 98,3 | 56,4 | 47,1 | 10,7 | 1,2 | 0,9 | 3,4 |
| 11 | 101,5 | 99,2 | 56,6 | 46,8 | 10,7 | 1 | 0,8 | 3,1 |
| 12 | 102 | 100,1 | 57,6 | 47,4 | 10,8 | 1,1 | 0,9 | 2,8 |
| 13 | 102,5 | 100,7 | 58,5 | 47,7 | 10,8 | 1,1 | 0,8 | 2,6 |
| 14 | 102,9 | 101,4 | 58,9 | 47,8 | 10,8 | 1,1 | 0,8 | 2,5 |
| 15 | 103 | 101,9 | 59,3 | 48,2 | 10,8 | 1,1 | 0,8 | 2,4 |

Примечание: t1 – температура теплоносителя на входе в сушильную камеру, °С; t2 – температура высушиваемого материала, °С; t3 – температура в камере сушки, °С; t4 – температура теплоносителя на выходе из сушильной камеры °С; P1 – давление на входе в камеру сушки, Па; P2 – давление на выходе из камеры сушки, Па; ф1 – относительная влажность теплоносителя на входе в камеру сушки, %; ф2 – относительная влажность теплоносителя на выходе из камеры сушки, %

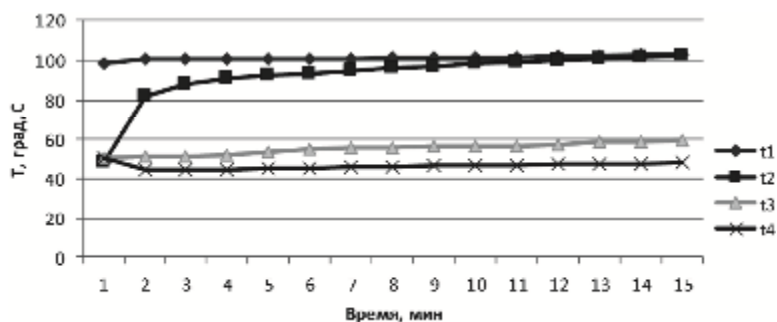


Рис. 4. Кинетика изменения температур

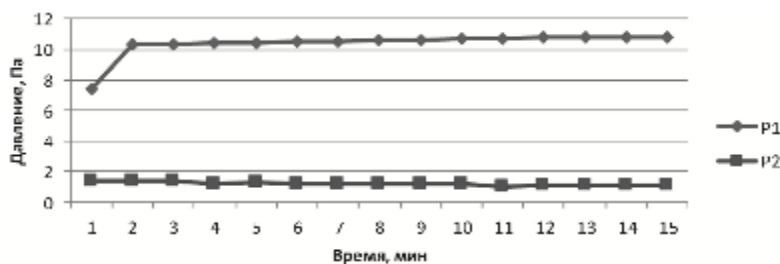


Рис. 5. Кинетика изменения давлений

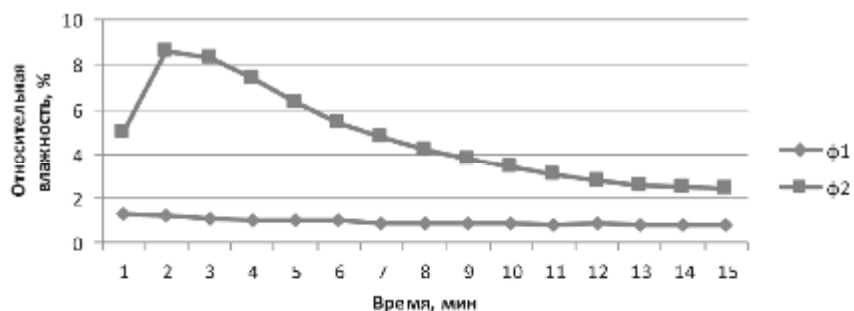


Рис. 6. Кинетика изменения влажности теплоносителя

Время сушки 15 минут. Расход воздуха 14,4 м³/час. Масса влажного песка составляла 275 граммов, масса сухого – 240 граммов. Итого материал потерял 12,7 % по массе. Сушка протекала в плотнопродуваемом слое. Из графиков влажности теплоносителей видно, что к 11 минуте достигалась допустимая остаточная влажность песка, а температура высушиваемого материала приближалась к температуре теплоносителя.

Время сушки 15 минут. Расход воздуха 7,2 м³/час. Масса влажного материала составляла 275 граммов, масса сухого – 253 граммов. Итого материал потерял 8 % по массе. Сушка протекала в плотнопродуваемом слое. При расходе теплоносителя равным 7,2 м³/час не происходит псевдооживления и как следствие приводит к уплотнению слоя и увеличению относительного перепада давлений. Из графиков относительной влажности теплоносителей видно, что даже при сушке в 15 минут расход воздуха 7,2 м³/час недостаточен для удаления влаги из строительного песка.

Таблица 3

Сосновые опилки (при расходе воздуха 14,4м³/час (50Гц))

| Время | t1 | t2 | t3 | t4 | P1 | P2 | φ1 | φ2 |
|-------|------|------|------|------|-----|-----|----|-----|
| 1 | 78,5 | 69,4 | 69,5 | 61 | 6,8 | 2,7 | 1 | 4,8 |
| 2 | 79,7 | 56,7 | 75,5 | 64,5 | 6,8 | 2,2 | 1 | 3,5 |
| 3 | 80,6 | 66,6 | 78,9 | 67,3 | 6,8 | 2,3 | 1 | 2,5 |
| 4 | 80,7 | 70,5 | 80,4 | 68,7 | 6,8 | 2,4 | 1 | 1,8 |
| 5 | 81,1 | 75,4 | 81,2 | 69,8 | 6,8 | 2,4 | 1 | 1,4 |
| 6 | 81,6 | 75,5 | 82,1 | 70,8 | 6,8 | 2,4 | 1 | 1,2 |
| 7 | 81,6 | 76,7 | 82,4 | 71,3 | 6,8 | 2,5 | 1 | 1 |
| 8 | 81,3 | 77,9 | 82,1 | 71,3 | 6,8 | 2,5 | 1 | 1 |
| 9 | 81,8 | 80,8 | 82,5 | 71,6 | 6,8 | 2,5 | 1 | 0,9 |

Примечание: t1 – температура теплоносителя на входе в сушильную камеру, °С; t2 – температура высушиваемого материала, °С; t3 – температура в камере сушки, °С; t4 – температура теплоносителя на выходе из сушильной камеры °С; P1 – давление на входе в камеру сушки, Па; P2 – давление на выходе из камеры сушки, Па; φ1 – относительная влажность теплоносителя на входе в камеру сушки, %; φ2 – относительная влажность теплоносителя на выходе из камеры сушки, %.

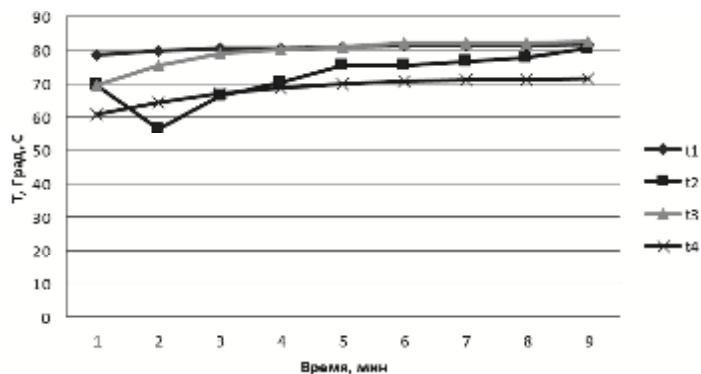


Рис. 7. Кинетика изменения температур



Рис. 8. Кинетика изменения давлений

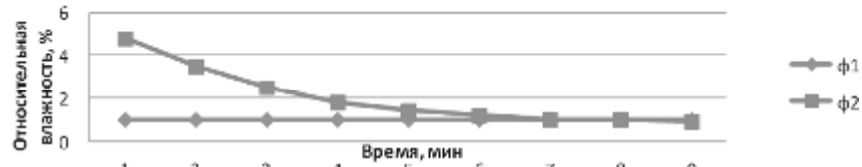


Рис. 9. Кинетика изменения влажности теплоносителя

Таблица 4

Сосновые опилки (при расходе воздуха 7,2м³/час (25Гц))

| Время | t1 | t2 | t3 | t4 | P1 | P2 | φ1 | φ2 |
|-------|------|------|------|------|-----|-----|----|-----|
| 1 | 73,5 | 63,3 | 63,3 | 54,9 | 6,3 | 3,1 | 1 | 4,8 |
| 2 | 76,8 | 47,2 | 62,5 | 54,2 | 6,7 | 2,1 | 1 | 5,9 |
| 3 | 77,1 | 55,5 | 67,8 | 58,7 | 6,8 | 2,4 | 1 | 4,7 |
| 4 | 78,4 | 72 | 73,5 | 63 | 6,8 | 2,6 | 1 | 3,3 |
| 5 | 79,4 | 77,1 | 77,2 | 65 | 6,8 | 2,6 | 1 | 2,4 |
| 6 | 79,6 | 81,7 | 78,3 | 66,8 | 6,8 | 2,7 | 1 | 1,7 |
| 7 | 79,8 | 83,8 | 80,4 | 67,9 | 6,8 | 2,8 | 1 | 1,4 |
| 8 | 80,5 | 85 | 81,6 | 68,8 | 6,8 | 2,8 | 1 | 1,2 |

Примечание: t1 – температура теплоносителя на входе в сушильную камеру, °С; t2 – температура высушиваемого материала, °С; t3 – температура в камере суши, °С; t4 – температура теплоносителя на выходе из сушильной камеры °С; P1 – давление на входе в камеру суши, Па; P2 – давление на выходе из камеры суши, Па; φ1 – относительная влажность теплоносителя на входе в камеру суши, %; φ2 – относительная влажность теплоносителя на выходе из камеры суши, %.

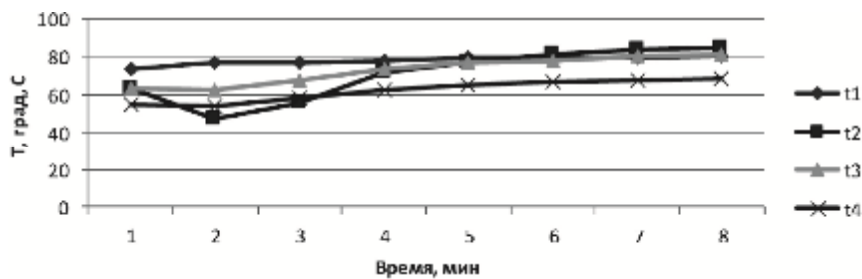


Рис. 10. Кинетика изменения температур

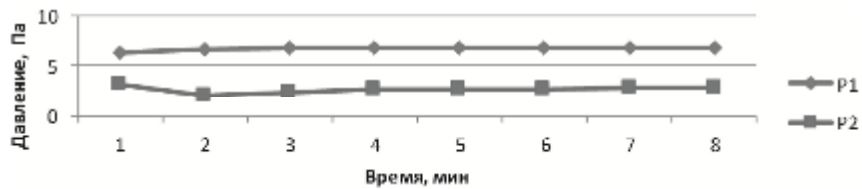


Рис. 11. Кинетика изменения давлений

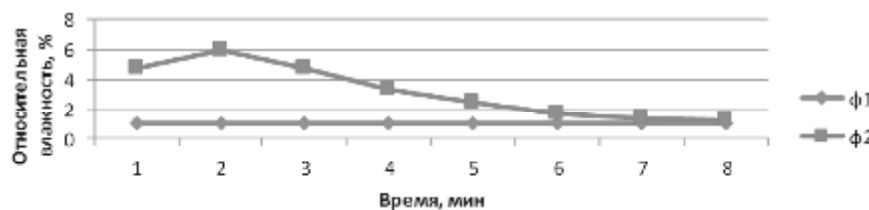


Рис. 12. Кинетика изменения влажности теплоносителя

Время сушки 9 минут. Расход воздуха 14,4 м³/час. Масса влажного материала 73 граммов, масса сухого – 15 граммов. Потеря по массе составила 79 %.

Время сушки 8 минут. Расход воздуха 7,2 м³/час. Масса влажного материала 65 граммов, масса сухого – 17 граммов. Потеря по массе составила 74 %.

Заключение

По представленным экспериментальным исследованиям следует, что в процессе сушки строительного песка увеличение скорости сушки достигается за счет увеличения расхода теплоносителя в определенные периоды сушки, тем самым конечное влагосодержание продукта достигается за минимальное время сушки. При сушке древесных опилок эффект от увеличения расхода теплоносителя в рекуперационной установке незначителен, поэтому рациональнее сушить их при более умеренных расходах теплоносителя и получать конечный сухой продукт с минимальными энергоресурсозатратами.

Список библиографических ссылок

1. Садыков Р.А. Процессы переноса при кратковременном контакте фаз (на примере сушки). – Казань: Изд-во КГЭУ, 2004. – 176 с.
2. Голубев Л.Г., Сажин Б.С., Валашек Е.Р. Сушка в химико-фармацевтической промышленности. – М.: Медицина, 1978. – 272 с.
3. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
4. Садыков Р.А., Антропов Д.Н. Энергосберегающая технология сушки биоактивных продуктов. – Казань: КГЭУ, 2005. – 172 с.
5. Садыков Р.А., Антропов Д.Н. Оптимальное управление и автоматизация технологии сушки биоактивных продуктов // Известия РАН, серия «Энергетика», 2005, № 6. – С. 85-92.
6. Садыков Р.А., Антропов Д.Н. Теплофизические свойства и кинетика сушки незаменимых аминокислот с учетом состава удаляемой влаги // Материалы XI Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ. – СПб., 2012. – С. 97-98.
7. Садыков Р.А. Тепломассоперенос в процессах вакуумной сушки и аппаратурное оформление технологии сушки лабильных биопрепаратов. Дисс... докт. техн. наук. – Казань, 1990. – 517 с.
8. Чернобыльский И.И., Тананайко Ю.М. Сушильные установки химической промышленности. – Изд-во: Техника, 1969. – 280 с.
9. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
10. Сушильные аппараты и установки. Каталог НИИХИММАШ, 3-е изд. – М., 1975.

Kodylev A.V. – engineer

E-mail: alexey.kodylev@bosh-buderus.ru

LTD «Buderus Otopitel'naya Tekhnika»

The organization address: 421001, Russia, Kazan, Chistopolskaya st., 64

Lozinov A.N. – post-graduate student

E-mail: a.lozinov@mail.ru

Sadykov R.A. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: sadykov_r_a@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Installation for convective drying loose and dispersed construction materials

Resume

The drying process is one of the most common operations in the production of building materials. Drying may be used as the final stages of production when the finished products are

its stage conditioning properties, and at the stage of raw material preparation, including the purpose of preheating the raw material or modifying its properties.

In the production of most building materials convective drying method used in a hot air stream which is used as a drying agent, preheated in a steam, or an electric heater for the recuperative heat exchanger. In some productions of combustion products used as a drying agent, diluted with air to the required temperature.

For each material or device is necessary to select their own, is not always fixed, the drying regime characterized by optimal coolant for the material parameters (temperature, relative humidity, velocity). These settings must correspond to the optimal conditions under which the material dries out in the shortest possible time while maintaining all the required properties, requirements to the target drying.

In the experimental studies of the kinetics of drying mortar sand and wood (pine) chips, made the necessary calculations of the process, to assess the feasibility of using regenerative convective drying of building materials, built corresponding graphic dependences of drying kinetics, showing the energy efficiency of the process of drying.

Keywords: recovery, heat, energy saving, drying, material, convection.

Reference list

1. Sadykov R.A. Transport processes by brief contact phase (for example, drying). – Kazan: Publishing house KGEU, 2004. – 176 p.
2. Golubev, L.G., Sazhin B.S., Valasek E.R. Drying in the chemical-pharmaceutical industry. – M.: Medetsina, 1978. – 272 p.
3. Sazhin B.S. Basic techniques of drying. – M.: Khimiya, 1984. – 320 p.
4. Sadykov R.A., Antropov D.N. Energy-saving drying technology bioactive products. – Kazan KSPEU, 2005. – 172 p.
5. Sadykov R.A., Antropov D.N. Optimal control and automation technology of drying of bioactive products // Proceedings of RAS, a series of «Energy», 2005, № 6. – P. 85-92.
6. Sadykov R.A., Antropov D.N. Thermal properties and drying kinetics of the essential amino acids with the composition removes moisture // Materials XI Russian conference on thermophysical properties of substances. – SPb., 2012. – P. 97-98.
7. Sadykov R.A. Heat and mass transfer in the process of vacuum drying and drying equipment design technology labile biological preparations. Diss... dokt. tehn. nauk. – Kazan, 1990. – 517 p.
8. Chernobylsky I.I., Tananayko Y.M. Dryers chemical industry: Publishing Tekhnica 1969. – 280 p.
9. Mushtaev V.I., Ulyanov V.M. The drying of dispersed materials. – M.: Khimiya, 1988. – 352 p.
10. Drying equipment and systems. General NIIHIMMASH, 3nd ed. – M., 1975.