

ШВИДКІСТЬ ЗНЕВОДНЕННЯ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ ТІЛ ЯК ФАКТОР ЕНЕРГОЄМНОСТІ СУШІННЯ

І.І. Гапонюк, д.т.н., НУХТ, м. Київ, Україна, zenidtar@gmail.com

Анотація: Досліджено особливості сушіння шару сипких капілярно-пористих тіл в прямотечійних шахтних сушарках за різної енергії робочих газів. Встановлено зв'язок потенціалу використання робочих газів в діючих сушарках із місцем перебування вологи в зневоджуваному тілі, розмірів тіла та швидкістю сушіння. Доведено вплив внутрішньо-капілярного тиску газів тіла на процеси вологообміну й поширенню в тілі гранули однорідність вологовмісту. Обґрунтовано спадні та комбіновані способи сушіння вологого й охолодження шару сухих капілярно-пористих тіл.

Ключові слова: шар сипких капілярно-пористих тіл, прямотечійна сушарка, робочі гази, сушіння, охолодження, теплота, волога.

СКОРОСТЬ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛ КАК ФАКТОР ЭНЕРГОЕМКОСТИ СУШКИ

И.И. Гапонюк, д.т.н., НУХТ, г.Київ, Украина, zenidtar@gmail.com

Аннотация: Исследованы особенности сушки слоя хорошо сыпучих тел в шахтных прямоточных сушилках при разной энергии рабочих газов. Установлена связь потенциала использования рабочих газов в действующих сушилках с местом пребывания влаги в обезвоживаемом теле, размеров обезвоживаемого тела и скоростью его сушки. Доказано влияние внутренне-капиллярного давления газов обезвоживаемых тел на процессы влагообмена и послойную в обезвоживаемом теле неоднородность влагосодержания. Обоснованы нисходящие и комбинированные способы сушки влажного и охлаждения слоя сухих обезвоживаемых тел.

Ключевые слова: слой обезвоживаемых тел, прямоточная сушилка, рабочие газы, сушка, охлаждение, теплота, влага.

SPEED OF DEHYDRATION OF CAPILLARY POROUS OF BODIES AS THE FACTOR OF POWER-HUNGRYNESS OF DRYING

I. Gaponyuk, d.t.s., NUFT, Kiev, zenidtar@gmail.com

Annotation: the features of drying of layer of capillary porous bodies are Investigational in mine grain dryers in productive terms at different energy of working gases. Connection of potential of the use of working gases is set in operating grain dryers with the mestome of stay of moisture in capillary porous bodies, its sizes and by speed of its drying. Influence of inwardly-capillary pressure of gases of capillary porous bodies is well-proven on processes moistly to the exchange and layer in its homogeneity of maintenance of moisture. The descending and combined methods of drying of moist and cooling of dry capillary porous bodies are reasonable.

Keywords: layer of capillary porous bodies, tower drier, working gases, drying, cooling, warmth, moisture.

Введение.

В практической деятельности наибольшего распространения получили два способа сушки – медленный и скоростной. Медленный применяют при незначительной влажности обезвоживаемых тел, которая всего на 1...3 % превышает критическую, а скоростной – при любой влажности обезвоживаемых тел. Медленный способ в большей мере реализован в разнообразных устройствах активного вентилирования неподвижного слоя обезвоживаемых тел значительной его толщины в складских емкостях и вентилируемых бункерах, а скоростной – в сушилках различных типов и конструкций.

Оба способа сушки относятся к конвективному типу сушки и основаны на влагопоглощительной способности рабочих газов разной температуры их нагревания. Если в первом способе рабочие газы не нагревают, или нагревают несущественно всего лишь на 15...25 °С и такие газы за своим химическим составом не существенно отличаются от воздуха окружающей среды, то во втором – рабочие газы нагревают существенно, до технологически обоснованных ограничений и такие газы могут испытывать существенные изменения химического состава, что в свою очередь может влиять на изменение химического состава обезвоживаемых тел в процессе их сушки [3].

Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки. К самым существенным из которых следует отнести сравнительно меньшие энергозатраты и скорость сушки для медленного способа, а большая скорость и энергозатраты – для скоростного. Небольшая скорость сушки первого способа сушки, которая в 120...150 раз меньше от скоростного способа, компенсируется неоднократно меньшими потерями энергии сушки. В шахтных сушилках эти потери энергии могут превышать расчетно-необходимые расходы тепла на фазовые превращения влаги содержащейся в слое обезвоживаемых тел в парообразное состояние в 2...3 раза, а для сыпучих тел больших размеров, условный диаметр которых превышает $(7...8) \cdot 10^{-3}$ м, фактические расходы энергии на сушку слоя КПТ в целом могут превышать расчетную потребность в 5...6 раз.

Объекты и методы исследований.

Ниже нами изложены малоисследованные способы управлением величиной внутри-капиллярного сопротивления диффузии влаги в слое сыпучих обезвоживаемых телах, как фактора влияния на энергозатраты и скорость сушки. При случае заметим, что внутри-капиллярное сопротивление диффузии, как фактор влияния на скорость перемещения влаги в обезвоживаемом теле и энергозатраты сушки может изменяться в достаточно широком диапазоне и по данным разных авторов может составлять 10...650 % от энергозатрат необходимых для фазовых превращений влаги, которая содержится в обезвоживаемом теле [1, 3, 4].

Для установления технологической возможности уменьшения потерь энергии скоростного способа сушки нами были выполнены исследования

технологии сушки шахтной прямоточной сушилки и усовершенствованных технологий на стендовой установке. Исследования проводили с шаром сыпучих капиллярно-пористых тел условным диаметром частичек $(0,7...1,2) \cdot 10^{-2}$ м переменной влажности 33...46.

Скоростью сушки управляли изменением величины энергии агента сушки. Энергию агента сушки изменяли переменными величинами температуры и скорости потока этих газов.

Эффективность сушки оценивали за скоростью, потерями тепла и энергозатратами сушки.

Потери тепла сушки устанавливали двумя способами:

- а) за разницей величин фактических и расчетных расходов энергии сушки;
- б) прямыми измерениями потерь энергии с теплотой отработанного агента сушки по показателям температуры и влагосодержанию отработанных газов:

$$E_{emp} = L \cdot \left(\frac{c_{c.n} \cdot (t_2 - t_0)}{\rho} + \frac{c_n \cdot d_2 \cdot (100 - t_0)}{1000} + \frac{\lambda_n \cdot d_2}{1000} \right) \quad (1)$$

где $c_{c.в}$ и c_n - удельные теплоемкости сухого воздуха и пара, кДж/кг; λ_n - теплота парообразования, кДж/кг; t_0 и t_2 - температура воздуха окружающей среды и отработанных рабочих газов, °С; ρ - плотность воздуха, кг/м³; d_0 и d_2 - влагосодержание воздуха и отработанных рабочих газов, г/кг_{с.в.}; L - расходы рабочих газов, м³.

По результатам исследований технологии сушки прямоточной сушилки ДСП-32от получена зависимость сопротивления внутрикапиллярной диффузии влаги и потери тепла отработанных газов за отклонениями фактических значений их температуры от температуры окружающей среды ($t_2 - t_0$).

Температуру рабочих газов принимали соответственно установленных нормативной документацией режимов сушки. Фиктивную скорость потока рабочих газов v изменяли от 0,42...0,48 м/с, что отвечает разнообразным типам сушилок отечественных и зарубежных производителей, до 0,10...0,15 м/с, что соответствует режимам активного вентилирования.

Величину сопротивления внутри-капиллярной диффузии (r) получали расчетным способом по установлению внутри-капиллярного равновесия энергии газов.

Результаты и их обсуждение.

Исследованиями установлено, что при неизменной температуре рабочих газов с уменьшением скорости рабочих газов втрое, от 0,4 до 0,13 м/с, скорость сушки уменьшается на 42...55 %. Соответственно и потери тепла с отработанными рабочими газами также уменьшались. Для установления потерь тепла, нами выполнены измерения температуры отработанных рабочих газов (t_2) для обоих случаев сушки малоподвижного слоя сыпучих капиллярно-пористых тел (КПТ) при разных скоростях струи этих газов.

В производственных условиях, мы полагаем, потери тепла с отработанными рабочими газами удобнее оценивать по значениям термического коэффициента (η), который можно установить несложными арифметическими расчетами через отношение отклонений температур рабочих и отработанных газов от температуры окружающей среды.

Для разных сушильных зон и этапов сушки этот коэффициент существенно изменяется. Особенно он существенно отличается для разных этапов сушки. Так, на начальном этапе сушки, в первые 30...40 мин, потери тепла с отработанными рабочими газами минимальные и термический коэффициент (η) не превышает значений 7,0 и 0,5 соответственно для медленного и скоростного способов сушки. На установившемся, или основном этапе сушки, значения этого коэффициента не превышают 1,0 и 15,0 соответственно для медленного и скоростного способов сушки. А на завершающем этапе сушки величина коэффициента (η) возрастает до 1,5 и 23,0 соответственно для медленного и скоростного способов сушки.

Из полученных экспериментальных данных мы смогли установить, что при некотором превышении определенных значений скорости сушки КПТ подведенная ему энергия рабочих газов расходуется лишь частично на обезвоживание, а большая ее часть теряется с отработанными газами. Следует заметить, что даже при наличии в КПТ влаги с небольшой энергией связи, как осмотически-удерживаемой, с увеличением скорости сушки малоподвижного слоя сыпучих КПТ потери энергии рабочих газов также возрастают в линейной зависимости. Дополнительные осложнения с извлечения влаги КПТ при увеличении скорости их сушки и с углублением зоны сушки во внутренние слои КПТ известно достаточно давно и это явление получило общепризнанное объяснение в наличии внутри-капиллярного сопротивления диффузии влаги. Однако его сущность и факторы влияния до сих пор еще однозначно не установлены, а известные объяснения не согласуются с расчетными данными. Мы полагаем, что общеизвестные причины возникновения внутрикапиллярного сопротивления диффузии влаги, как химический, вследствие изменения энергии связи влаги с телом КПТ и механический, из-за отдаленности влаги от поверхностного слоя обезвоживаемого тела, – следует дополнить энергетической составляющей, которая соотносится с нарушением внутрикапиллярного равновесия энергии газов и, по нашим расчетным данным, эта составляющая доминирует по величине и воздействию на кинетику сушки [2].

Влияние скорости сушки и температуры рабочих газов, как факторов изменения движущего потенциала сушки, на объемы поглощенных капиллярами КПТ газов и дефицита капиллярных газов представлено на рис.1.

По значениям этих величин можно установить величину сопротивления внутрикапиллярной диффузии влаги, или же ее основную часть, как энергию внутрикапиллярного разрежения.

По результатам полученных данных установлены предельные скорости сушки и температура рабочих газов на разных этапах сушки малоподвижного слоя КПТ с превышением значений которых начинает существенно расти сопротивление внутри капиллярной диффузии влаги, затраты энергии на его преодоление и потери тепла с отработанными рабочими газами.

Так, для сушки малоподвижного слоя КПТ условным диаметром частиц $(0,7...1,2) \cdot 10^{-2}$ м влажностью 28...30 %, - на начальном этапе процесса сушки

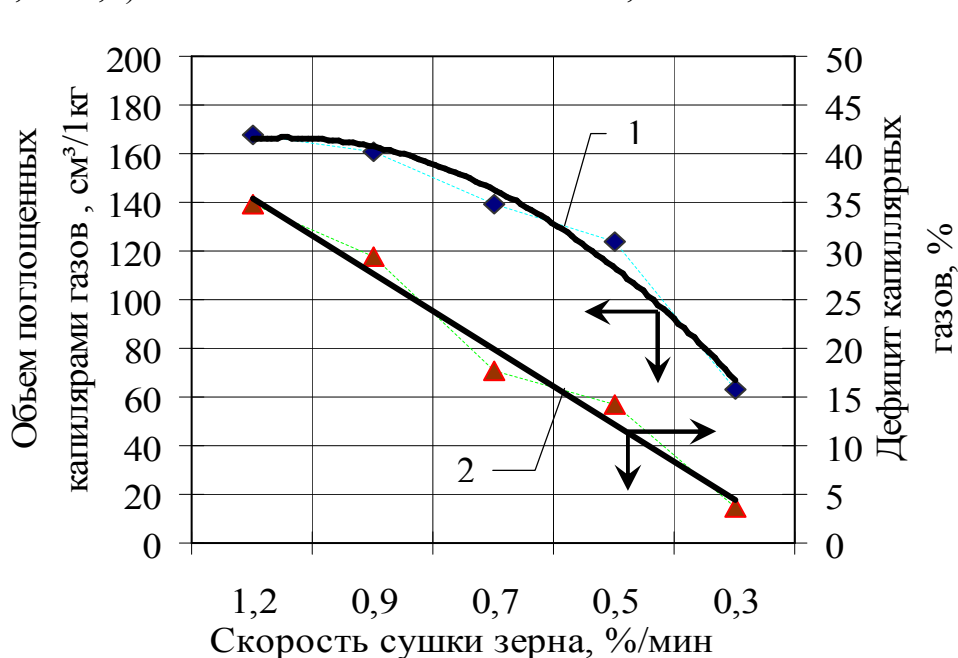


Рис.1. Зависимость поглощения газов слоем КПТ от скорости его сушки: 1) – объем поглощенных капиллярами газов; 2) – дефицит капиллярных газов относительно к объему извлеченной влаги из КПТ.

энергию рабочих газов следует увеличить на 15...20 %, в сравнении с традиционным и режимами, а на окончательном – уменьшить на 40...60 %, уменьшив скорость сушки до 0,07...0,09 %/час.

Полученные полуэмпирические

зависимости (2) и (3) позволяют рассчитать ожидаемые потери тепла с отработанными газами при разных скоростях сушки (5) и температуры рабочих газов (6) исследуемых КПТ в сушилке ДСП-32от:

$$\delta_z = -1,8 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right)^2 + 4,6 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right) + 38,7 \quad (2)$$

$$\delta_z = 52 \cdot \ln(t_1) + 13,6 \quad (3)$$

Заключение и выводы.

1. С увеличением размеров капиллярно-пористых частичек и скорости сушки в сушилках существенно увеличивается расход энергии, который может превышать расчетно-необходимый в 2...4 раза. Соответственно уменьшается потенциал использования рабочих газов, а относительная влажность отработанных рабочих газов уменьшается от 90...95 до 45...50 % и меньше;

2. Уменьшить потери энергии сушки в сушилках можно применением комбинированных нисходящих режимов сушки увеличением энергии рабочих газов в сравнении с традиционными температурными режимами на начальном этапе сушки и существенного уменьшения на завершающем;

3. Для уменьшения энергозатрат и микротравмирования частичек КПТ целесообразно применять этап "отлежки" перед завершающим этапом их сушки продолжительностью 7...12 мин для мелкозернистых частичек, и 15...35 мин – для крупнозернистых. С увеличением начальной влажности КПТ, больших значений скорости сушки и размеров частичек КПТ время «отлежки» возрастает;

4. Существенно уменьшить внутрикапиллярное сопротивление диффузии влаги и потери тепла с отработанными газами можно уравниванием внутрикапиллярного давления заданными режимами сушки и изменением содержания «защемленных» в порах частичек КПТ газов.

5. Меньшее внутрикапиллярное сопротивление диффузии и потери энергии отвечают более мягким режимам сушки и для режимов активного вентилирования КПТ слабо нагретыми рабочими газами на 15...25 °С они достигают наименьших значений.

Литература:

1. Бурдо А.Г. Безутешный выходит мониторинг энергозатрат// О.Г.Бурдо, О.В Зыков, В.Д.Донкоглов // Зерно и хлеб. - 2006. - № 3. - 46-48.

2. Гапонюк И.И. Уменьшение внутреннего сопротивления диффузии влаги// Зерновые продукты и комбикорма, 2009 № (29)-С.43-49 и №3(30)-С.47-50.

3. Филоненко Г.К. Сушка пищевых растительных материалов/ Г.К. Филоненко, М.А. Гришин, Л.М. Гольденберг.- М.: Пищевая пром-ть, - 1971. - 439 с.

4. Станкевич Г.Н. Расчет продолжительности сушки по уравнениям кинетики // Научные труды ОНАХТ, 2006. - Т. 2. - Вип. 28. - С. 66-72.