

Р. Р. Гайфуллина, Л. Ю. Яруллин, З. И. Зарипов,
Ф. М. Гумеров

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ СУШКИ НА СКОРОСТЬ СУШКИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И НА ИХ КАЧЕСТВО

Ключевые слова: сверхкритическая сушка древесины, сверхкритические технологии, сверхкритический CO_2

Предложена энергосберегающая технология для сушки пористых материалов, позволяющая значительно сократить энергозатраты на влагоудаление. Представлены экспериментальные данные по сверхкритической сушке древесины в диапазоне температур 50 – 80 °С и давлений 100 – 300 бар.

Key words: supercritical drying of wood, supercritical technologies, supercritical CO_2

The energy-saving technology for porous materials drying is presented, which allows to significantly reduce of power inputs for moisture removal. The experimental data of wood supercritical drying for range of 50 – 80 °C temperatures and 100 – 300 bar pressures.

Введение

Повышенный интерес к сокращению продолжительности времени сушки и снижению ее энергоемкости с сохранением качества продукта вызван жесткими предъявляемыми требованиями по энергоресурсосбережению, повышением цен на энергоносители и большой конкуренцией на рынке. Поскольку до сих пор процесс сушки остается ключевым этапом для получения конкурентоспособного материала или продукта и может составлять до 30 – 50 % от стоимости готового продукта [1, 2]. Поэтому сокращение энергозатрат на сушку с сохранением качества высушенного продукта всегда были актуальным направлением научных исследований, способствующих решению общей проблемы рационального использования энергоресурсов.

В настоящее время одним из прогрессивных способов сушки и повышения интенсивности рассматриваемого процесса является использование сверхкритических технологий. [3]

Сверхкритическую (СК-) сушку в зависимости от сверхкритического растворителя условно подразделяют на следующие типы [9]: сушка со сверхкритическим органическим растворителем, сверхкритическая газовая сушка, сушка сверхкритической смесью растворителей (смесь CO_2 и органического растворителя), сверхкритическая газ-экстракционная сушка, сверхкритическая распылительная сушка для получения мелких частиц.

Особое преимущество СК-сушки является то, что отсутствует межфазная граница пар-жидкость в гомогенной фазе. Таким образом, при СК-сушке отсутствует вынужденные капиллярные натяжения, которые наблюдаются при конвективной сушке, и, тем самым помогает сохранить структуру образца (предотвратить растрескивание и распад вещества). [4] Кроме того, применение СК-сушки позволяет избежать перегрева материала и его теплового повреждения, поскольку, например, CO_2 имеет критическую температуру 31,1 °С, что позволяет сушить при относительно низких температурах.

Известно, что диффузия газов и жидкостей является одним из основных факторов, влияющих на транспортные свойства в материале. В отличие от конвективной сушки СК-сушка имеет высокий коэффициент диффузии, что позволяет увеличить массоперенос при невысоких температурах сушки и позволяет сохранить структуру материала, т.е. позволяет избежать сильной усадки материала и растрескивания.

Сверхкритическая газ-экстракционная сушка была использована авторами [11] для сушки затопленных археологических древесин. Исследования показали [11], что качество сушки археологической древесины в СК-среде значительно превосходит конвективной сушки – нет трещин, разрушения структуры и усадки. Кроме того значительно увеличивается срок сохранения археологической древесины высушенной СК-сушкой, чем при использовании конвективной сушки, так как СК-сушка является биологически стерильным процессом, останавливающий процесс микробного распада материала. Авторами отмечено, что сверхкритическая сушка гораздо быстрее, чем сублимационная сушка.

В работах [12, 13] предложены способы осуществления сверхкритической сушки древесины и их режимные параметры.

В данной работе посвящена оценке влияния режимных параметров СК-сушки древесины на эффективность влагопереноса при температурах 50 – 80 °С и давлении 100, 200, 300 бар.

Экспериментальная часть

В лабораториях кафедры теоретических основ теплотехники КНИТУ были проведены экспериментальные исследования по использованию сверхкритической технологии для сушки древесины. В качестве сушимого материала была выбрана сосна обыкновенная двух размеров 50 мм и 25 мм толщиной с начальной влажностью 60 – 140 %. Образцы были изготовлены из ядровой и заболонной частей сосны. В экспериментальном исследовании сушки использовалась установка фирмы Thar для сверхкритической сушки (рис. 1). Система создания давления состоит из баллона с

CO₂ (1) объемом 50 л, холодильного аппарата (2), охлаждающего рабочие камеры насоса, плунжерного градиентного насоса фирмы Thar Tech (3), качающего газ с постоянным объемным расходом в диапазоне от 5 до 200 г/мин. В начале эксперимента диоксид углерода, находящийся в рабочей камере насоса, охлаждается и конденсируется с помощью холодильного аппарата, и в жидкой фазе выталкивается плунжером насоса в систему. После этого плунжер возвращается в исходное положение, и рабочий объем вновь заполняется газом. Благодаря тому, что в насосе установлены две камеры, плунжеры которых работают в противофазе, а также благодаря наличию ресивера, установленного перед входом в систему, достигается равномерность расхода газа.

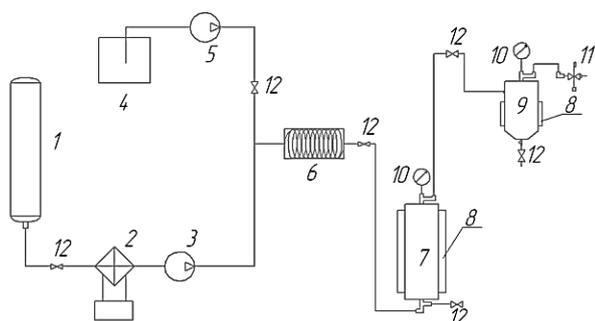


Рис. 1 - Схема экспериментальной установки для сверхкритической сушки: 1 – баллон CO₂; 2 – холодильник; 3 – насос для CO₂; 4 – емкость для со-растворителя; 5 – насос для со-растворителя; 6 – электронагреватель; 7 – экстракционный сосуд; 8 – нагревательная рубашка; 9 – циклонный сепаратор; 10 – манометр; 11 – ручной игольчатый клапан; 12 – вентили высокого давления

Рабочее давление в системе измеряется аналоговым и цифровым манометром (10). Расход газа задается с помощью массового расходомера Кориолиса и данные выводятся на дисплей системы управления или компьютер по интерфейсу RS 232C.

Нагрев диоксида углерода, поступающего в экстракционный сосуд осуществляется с помощью электронагревателя (6). Электронагрев экстракционного сосуда осуществляется с помощью электрической нагревательной рубашки. Для контроля температуры используются термодары J-типа, управление нагревателями осуществляется с помощью реле нагревателей.

Влажность каждого образца определялась весовым методом в соответствии с ГОСТ 16483.7-71.

В рамках научного исследования древесные образцы были подвергнуты сушке в среде сверхкритического CO₂ (СК-CO₂) при температурах 50, 60, 70, 80 °C, давлениях 100, 200, 300 бар и расходе CO₂ 5 – 20 г/мин. Каждый цикл длился 40 минут, а время декомпрессии – от 5 до 60 минут. Образцы после каждого цикла выдерживались при комнатной температуре и атмосферном давлении от 10 до 20 минут.

Результаты и их обсуждение

На рисунках 2 – 4 представлены результаты экспериментального исследования СК-сушки древесины.

Было замечено, что наибольшее влагоудаление из древесины происходит в первые два цикла, а после интенсивность влагоудаления падает. За первые два цикла можно удалить до 38,5 % влаги.

На рисунке 2 представлена кривая сушки для древесины с толщиной 25 мм. Видно, что наибольшее влагоудаление из древесины происходит в первые два цикла, а после интенсивность влагоудаления падает. Кривая СК-сушки древесины с толщиной 50 мм аналогична представленной кривой сушке на рисунке 2.

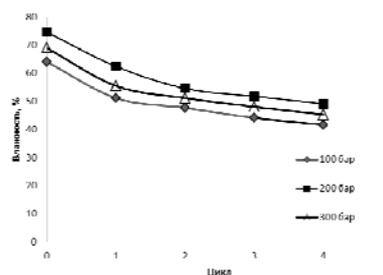


Рис. 2 - Кривые сушки древесины с толщиной 25 мм при 50 °C и давлениях 100, 200, 300 бар.

Анализ результатов показал, что с достижением древесины 40 – 56% влажности дальнейшая ее сушка в СК-CO₂ нецелесообразна из-за низкой интенсивности влагоудаления.

На рисунках 3 и 4 представлены влияние температуры и давления на удаление влаги из древесины в среде СК-CO₂.

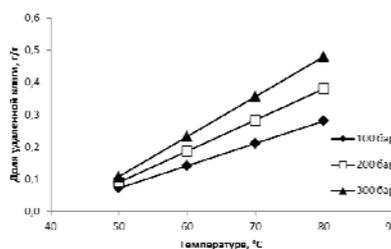


Рис. 3 - Влияние температуры на удаление влаги из древесины с толщиной 25 мм при 100, 200, 300 бар в среде СК-CO₂

Из представленных кривых видно, что на скорость влагоудаления в большей степени оказывает влияние температура, чем давление.

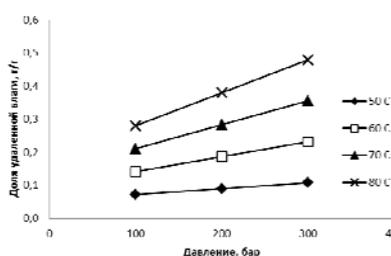


Рис. 4 - Влияние давления на удаление влаги из древесины с толщиной 25 мм при 100, 200, 300 бар в среде СК-CO₂

Внешний осмотр образцов после сушки показал, что уже после первого цикла на образцах из ядровой древесины образуются трещины. Количество и размер трещин на образцах из ядровой части древесины в большей степени зависят от времени декомпрессии: чем дольше происходит декомпрессия, тем меньше трещин и их размеры. После первого цикла сушки на образцах из заболонной части древесины трещин не было обнаружено.

Из выше представленных результатов следует, что сушка древесины сверхкритическим методом может значительно сократить энергозатраты на удаление свободной влаги. А для последующей сушки древесины до требуемой влажности целесообразно использовать другую технологию сушки, например, вакуумно-импульсную сушку [14, 15].

Литература

1. A. S. Mujumdar, L. X. Huang, *Global R&D Needs in Drying/ Drying Technology*, 25: P.647–658, 2007.
2. R.J. Bogers, L.E. Craker, D. Lange (eds.), *Medicinal and Aromatic Plants/ Springer*. Printed in the Netherlands, 2006. – pp. 237-252.
3. Гумеров Ф.М., Сабирзянов А.Н., Гумерова Г.И. Суб- и сверхкритические флюиды в процессах переработки полимеров. – Казань: изд-во «Фэн», 2007. – 336 с., ил.
4. Namatsu, H., Yamazaki, K., and Kurihara, K. Supercritical drying for nanostructure fabrication without pattern collapse. *Microelectronic Engineering*, 46(1-4), 1999: pp. 129-132.
5. Лыков А.В. Теория Сушки. М.: Энергия, 1968. – 472 с.
6. Кретчетов И. В Сушка древесины. – 3-е изд.перераб. – М.: Лесн.пром-сть, 1980. – 432 с.
7. Krokida, M. K., Marinos-Kouris, D. Rehydration kinetics of dehydrated products." *Journal of Food Engineering*, 57(1), 2003: pp. 1-7.
8. Гинзбург А.С., Резчиков В.А. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. М.: Пищевая промышленность, 1966. - 196 с.
9. Zheng S., Hu X, Ibrahim A.-R. et.al., *Supercritical Fluid Drying: Classification and Applications, Recent Patents on Chemical Engineering*, Vol. 3, No. 3, 2010: pp. 230 – 244.
10. von Behren, J., Chimowitz, E. H., Kumaran, V., Shapir, Y., and Fauchet, P. M. (1997) "Critical behaviour in confined fluids: application to supercritical drying of porous silicon." *The 4th International Symposium on Supercritical Fluids*.
11. Barry Kaye, David J. Cole-Hamilton and Kathryn Morphet, *Supercritical drying: a new method for conserving waterlogged archaeological material. Studies in Conservation*, 45, 2000: pp. 233-252
12. US 8, 096, 064 B2. Matsunaga et.al. Method for drying lumber, method of impregnating lumber with chemicals, and drying apparatus.
13. US 2010/0058607 A1. Franich et.al. Wood drying.
14. Гайфуллина Р.Р., Курбангалеев М.С., Зарипов З.И., Анашкин Д.А. Экспериментальная установка для исследования кинетики сушки капиллярно-пористых материалов по вакуумно-импульсной технологии. // *Вестник Казанского государственного технологического университета*. Казань. - 2011. – №2 – С. 132 – 137.
15. Гайфуллина Р.Р., Курбангалеев М.С., Зарипов З.И., Willson В. D. Сушка растительного сырья. *Вестник Казанского государственного технологического университета*. – Казань. – 2011. – №7. – С. 42 – 45.

© Р. Р. Гайфуллина – асс. каф. теоретических основ теплотехники КНИТУ, rezeda_gayfullina@mail.ru, Л. Ю. Яруллин – инженер той же кафедры, З. И. Зарипов - д.т.н., профессор той же кафедры; Ф. М. Гумеров - д.т.н., проф., зав. каф. теоретических основ теплотехники КНИТУ.