

УДК 66.047, 3.049.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ РАЗЛИЧНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ**

Вилисов Н.Д., аспирант группы ТТа-241, младший научный сотрудник НИЛ  
КиПУМсППП, ассистент кафедры ТЭ,

Тыра А.В., студент группы ТЭМ-231, техник НИЛ КиПУМсППП, ассистент  
кафедры ТЭ,

Фадеев П.И., студент группы ТЭБ-211, техник НИЛ КиПУМсППП

Научный руководитель: Ушаков К.Ю., к.н., старший научный сотрудник НИЛ  
КиПУМсППП, доцент кафедры ТЭ

Кузбасский государственный технический университет

имени Т.Ф. Горбачева

г. Кемерово

Процесс сушки влажных материалов является коллоидно-тепло-физическим процессом, в котором форма связи влаги с материалом играет решающую роль в характере его протекания. Поэтому вскрытие механизма сушки, его молекулярной природы необходимо для нахождения научно-обоснованного, оптимального режима сушки.

Кинетика процесса сушки должна базироваться на установленном и обоснованном механизме сушки, и только тогда можно получить наилучшие технологические свойства высушенного материала.

Теория процесса сушки базируется на современных представлениях о тепло- и влагообмене в коллоидных, капиллярно-пористых телах, согласно которым закономерности протекания процесса сушки различны в разных периодах. Эти качественные изменения являются коренными, происходят скачкообразно (наличие критических точек) и обусловлены скрытым количественным изменением механизма перемещения влаги [1].

Сушка является необходимым процессом, в котором материалы приобретают окончательные технологические свойства. Время сушки определяет качество конечного продукта. Поэтому основная задача кинетики и технологии сушки – определение ее длительности.

Целью работы является исследование кинетики сушки различных материалов: древесины, материала рудного происхождения и угля, с довольно широко отличающимися теплофизическими характеристиками: такими, как исходная влажность, удельная теплоемкость, средний диаметр пор, гранулометрический фракционный состав и краевой угол смачивания.

В качестве сырья в работе использовались опилки сосны, предварительно увлажненные, уголь марки Д двух гранулометрических фракций: 0,2-2 мм и 2-16 мм и концентраты плавиковошпатовые (флюоритовые).

Перед проведением процесса сушки была определена влажность образцов согласно ГОСТ 52911–2013. Результаты представлены в таблице 1, где приведены справочные теплоемкости этих образцов.

Таблица 1. Исходная влажность, теплоемкость и размер пор образцов

Образец	Влажность, %, $W^p$	Краевой угол смачивания, $\theta$ , °	Диапазон размера гранул, мм	Средний диаметр пор, нм	Теплоемкость, $c$ , кДж/(кг·К)
Опилки сосны	65,93	$30 \pm 2$ [2]	1-3	7,38	2,51 [5]
Концентраты плави́ковошпатовые (флюоритовые)	9,64	$38 \pm 4$ [3]	$\leq 0,14$	16	0,86 [5]
Уголь Д	19,48	$67 \pm 3$ [4]	0,2-2	11,21	1,38 [5]
Уголь Д	16,43		2-16		

Из таблицы 1 видно, что влажность древесины на рабочую массу имеет значительную величину – 65,93%. Уголь марки Д различного гранулометрического состава имеет близкие по влажности значения (16,43-19,48%). Наименьшая влажность принадлежит неорганическому образцу рудного происхождения – флюориту (9,64%).

Необходимо отметить, что наименьший диаметр пор принадлежит древесине (опилки) – 7,38 нм, средний размер пор из рассматриваемых образцов имеет уголь марки Д (11,21 нм), а рудный образец (флюорит) размер пор которых составляет 16 нм. Каждый из образцов имеет кроме капиллярной влаги свободную поверхностную влагу, которая удаляется с меньшими энергетическими затратами.

По классификации форм связи влаги с материалом, предложенной П.А. Ребиндрером [1], образцы, исследуемые в работе, имеют кроме поверхностной, механическую связь влаги с материалом в микрокапиллярах и макрокапиллярах, так как диаметры капилляров образцов  $< 100$  нм, и адгезия данной формы в капиллярах обусловлена механическим удерживанием воды (слой влаги у стенок пор связан адсорбционно).

Кроме этого, удаление влаги при сушке зависит от краевого угла смачивания материала воды с поверхностью материала (таблица 1). Уголь ближе относят к гидрофобным материалам (краевой угол смачивания  $67 \pm 3^\circ$ ), древесина традиционно относится к гидрофильным материалам, имеющая небольшой краевой угол смачивания ( $30 \pm 2^\circ$ ), а рудные продукты (флюорит) также смачиваемы и занимают для исследуемых образцов промежуточное состояние ( $38 \pm 4^\circ$ ).

Закономерность удаления влаги из капиллярных структур состоит в том, что чем больше гидрофильность, т.е., чем меньше краевой угол смачивания, тем меньшую энергию необходимо подвести для удаления влаги в связи с тем, что перед вогнутым мениском воды в капилляре образуется меньшее

давление относительно давления окружающей среды. Противоположное направление действия связано с гидрофобностью, когда мениск в капилляре выпуклый или плоский, и над ним создается избыточное давление по отношению давления окружающей среды. Следовательно, из древесины, имеющей в капиллярах влагу, наиболее легче ее удалить, чем из угля, имеющего больший краевой угол смачивания.

Для проведения процесса сушки использовался сушильный шкаф ШС-80-01 СПУ; для контроля массы образцов во время сушки использовались весы ВСЛ-200/0,1; для контроля температуры в слое образца использовался измеритель-нагреватель ОВЕН ТРМ 202 с термопарой типа ХА; для контроля времени сушки использовался секундомер.

Перед проведением процесса сушки взвешивались пустые бюксы с крышкой. Затем в бюксы помещали образцы так, чтобы была возможность установить термопару в слое объекта исследования. Затем бюксы накрывались крышкой и взвешивались. Масса пустой бюксы с крышкой и масса бюксы с крышкой и помещенным в нее образцом заносились в журнал наблюдений. Бюксы в процессе сушки были открыты.

Термопара устанавливалась в сушильном шкафу через технологическое отверстие в верхней части сушильного шкафа.

Температура в сушильном шкафу поддерживалась на отметке 115 °С. Каждые 3 минуты образцы вынимались из сушильного шкафа, бюксы, в которых находились образцы, накрывались крышкой, и взвешивались. Данные заносились в журнал наблюдений. Также перед извлечением образцов из сушильного шкафа в журнал наблюдений заносилась температура образца в слое.

Сушка продолжалась до тех пор, пока два соседних взвешивания не будут отличаться на  $\pm 0,05\%$  и менее.

По полученным данным была определена потеря влаги для каждого промежутка времени  $\Delta W_i^p$ :

$$\Delta W_i^p = G_1 \frac{u_1 - u_2}{100 - u_2},$$

где  $G_1$  и  $u_1$  – начальная масса и влажность материала, поступающего на сушку;  $u_2$  – влажность высушиваемого материала через каждый последующий промежуток времени.

Также была определена скорость сушки (отношение потери массы влаги от времени, %/с). На основе этих данных были построены кривые сушки и кривые скорости сушки, на которых отражаются особенности процесса изменения состояния влажных материалов.

На рисунках 1-4 изображены кривые сушки образцов.

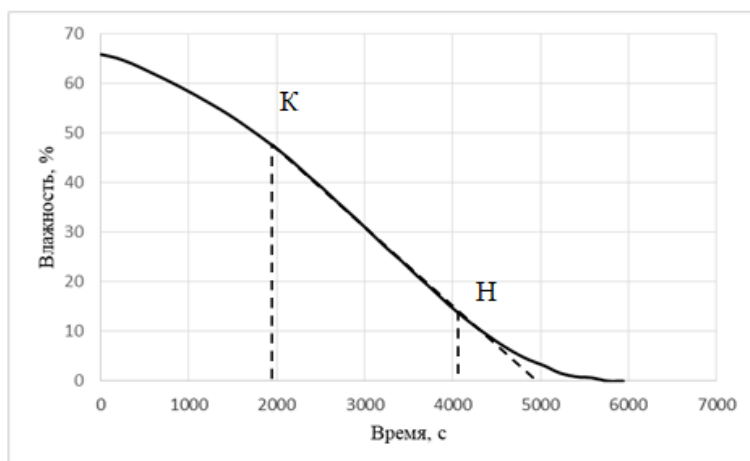


Рисунок 1. Кривая сушки опилок сосны

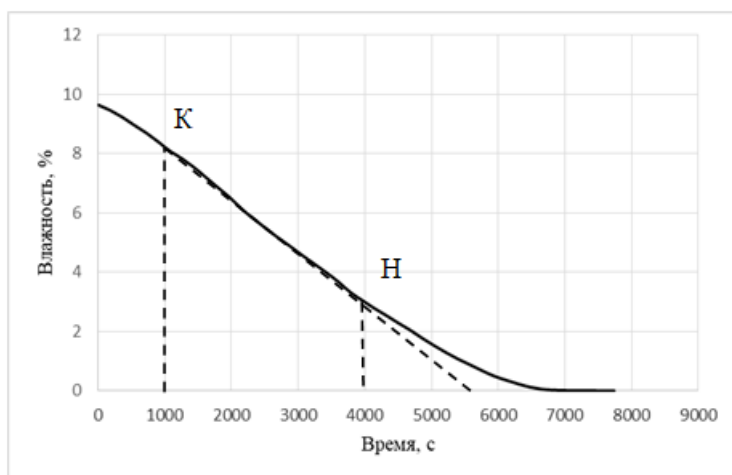


Рисунок 2. Кривая сушки концентратов плагиоклошпатовых

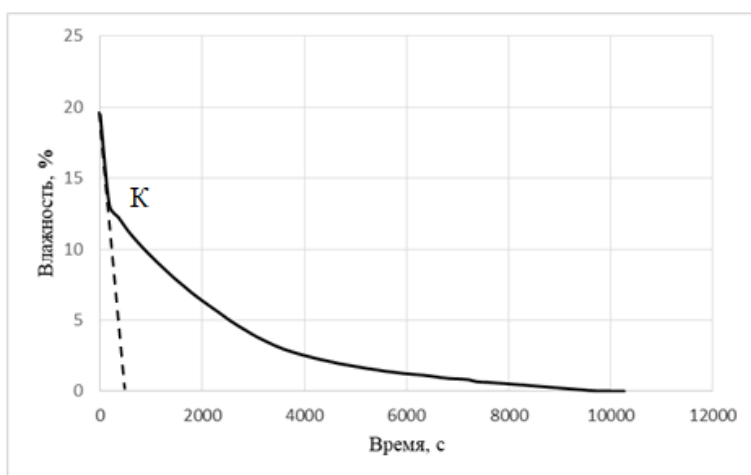


Рисунок 3. Кривая сушки угля Д (фракция 0,2-2 мм)

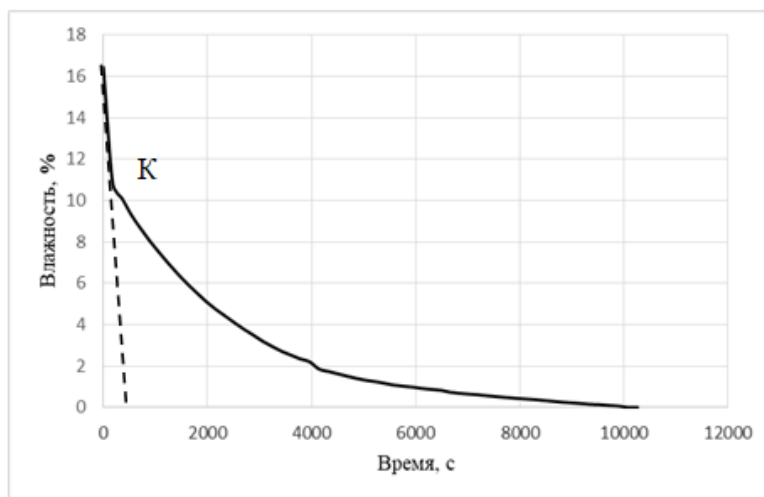


Рисунок 4. Кривая сушки угля Д (фракция 2-16 мм)

Удобно провести анализ результатов кривых сушки древесины и флюорита: они имеют поверхностную и капиллярную влагу, но значительно отличающиеся значения удельной теплоемкости. Начальный процесс сушки до точки К характеризуется прогревом материала и удалением поверхностной влаги с нарастающей скоростью сушки. Процесс удаления поверхностной влаги древесины продолжался почти 33 минуты против 16 минут для флюорита. Полагаем, что это связано с большей теплоемкостью древесины, чем флюорита, а также увеличенным количеством свободной влаги при близком их краевом угле смачивания в процессе удаления поверхностной влаги.

Если рассматривать кривые сушки по времени удаления влаги до конечной влажности 0,5% (рис. 1, 2), то можно свидетельствовать, что удаление влаги из древесины и флюорита, происходит примерно за 90 мин. В то же время, более высокий краевой угол смачивания угля марки Д способствует увеличению времени удаления капиллярной влаги до конечной 0,5%, которая составила 150 минут (рис. 3, 4). Отметим, что уменьшение влажности за указанные времена сушки произошло у древесины, флюорита и угля крупностью 0,2 – 2 и 2-16 соответственно 65,43; 9,14; 18,98 и 15,93%. Из этого следует, что наиболее затруднительно влага удаляется из угля и это требует значительных энергетических затрат.

Кроме того, кривые процесса сушки угля значительно отличаются от сушки древесины и флюорита. В начальный период снижение влажности происходит интенсивно. Кривая сушки с самого начала является прямой линией, отвечающей за постоянную (равномерную) скорость сушки, что видно на рис. 3-4. Полагаем, что в этот период удаляется свободная влага с одновременным прогревом материала. Следующий период сушки относится к неравномерной скорости удаления влаги, связанный с ее испарением из капилляров и асимптотически приближающуюся к состоянию гигроскопической влаги, когда убыль влаги практически прекращается. В первый период сни-

жение влажности для мелкой фракции произошло на 7%, а крупной на 6% за одинаковое время 5 минут.

По данным, полученным из кривой сушки, можно построить кривые скорости сушки, предварительно рассчитав скорость сушки по количеству удаленной влаги и времени удаления.

На рисунках 5-8 изображены кривые скорости сушки образцов.

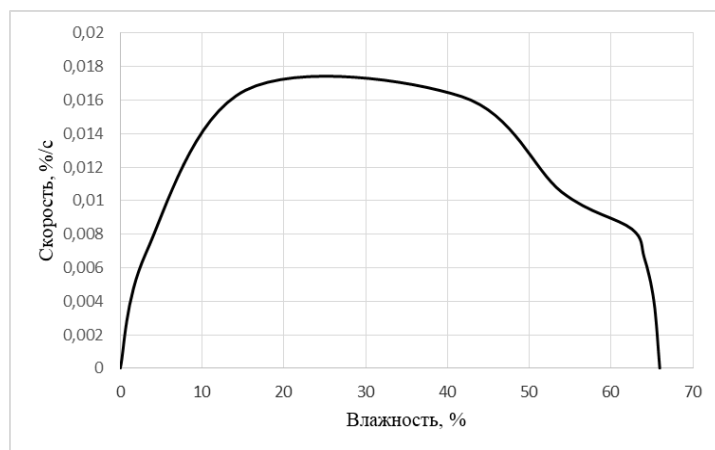


Рисунок 5. Кривая скорости сушки опилок сосны

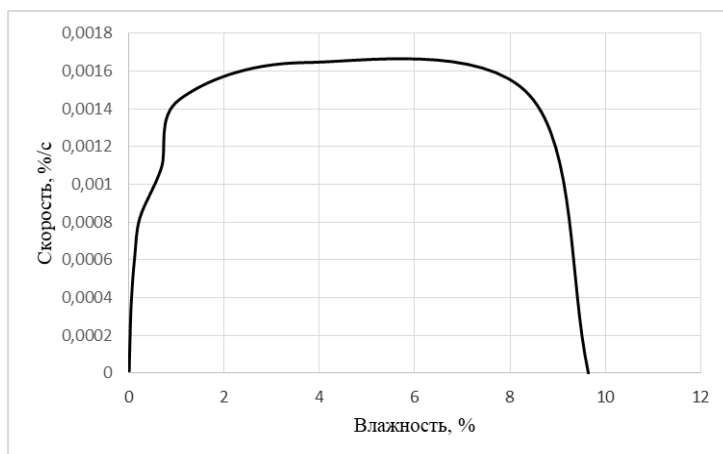


Рисунок 6. Кривая скорости сушки концентратов плавленого шпата

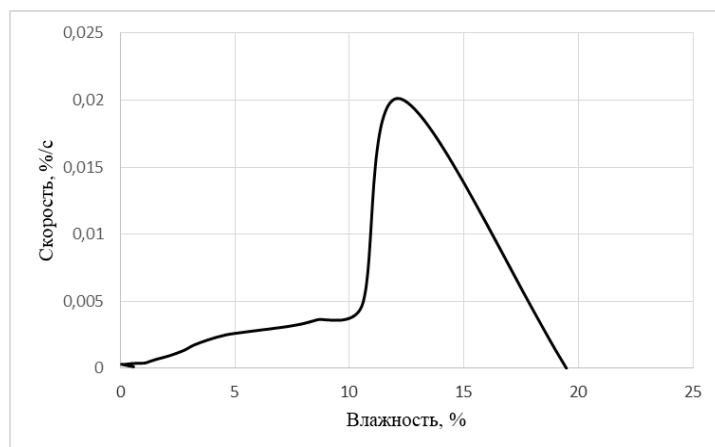


Рисунок 7. Кривая скорости сушки угля Д (фракция 0,2-2 мм)

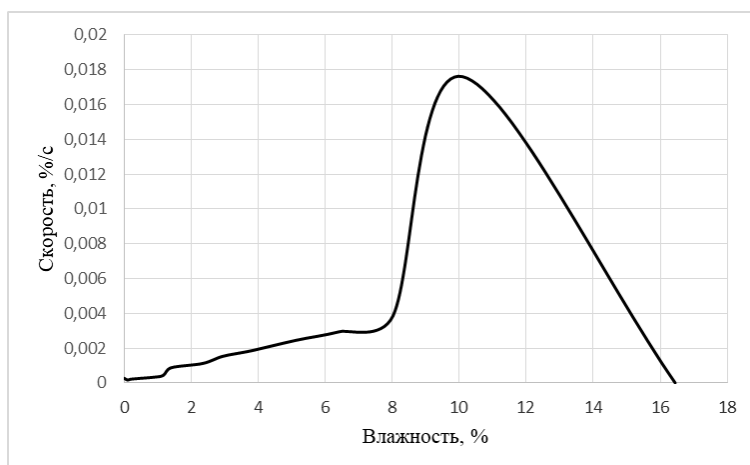


Рисунок 8. Кривая скорости сушки угля Д (фракция 2-16 мм)

Кривые скорости сушки – графическая зависимость между скоростью сушки и изменением влажности материала. Различная форма кривых скорости сушки объясняется характером соединения влаги с материалом и разным механизмом ее перемещения с поверхности и из капилляров.

У кривых скорости сушки опилок сосны и плавиковошпатовых концентратов видна линия прогрева материала, затем эта линия переходит в прямую, соответствующую постоянной скорости. Далее эта линия в первой критической точке (К на графиках) идет на спад, вплоть до окончания сушки (период падающей скорости).

У кривых скорости сушки угля Д разных фракций также видна линия прогрева материала и удаления влаги с постоянной скорости сушки. Далее происходит период сушки с падающей скоростью, вплоть до окончания сушки.

### Выводы

1. Были определены исходные влажности образцов. Так влажность сосновых опилок на рабочую массу составляет 65,93%. Уголь марки Д различного гранулометрического состава имеет близкие по влажности значения (16,43-19,48%). Наименьшая влажность принадлежит плавикошпатовым концентратам – 9,64%.

2. Также было проведено сравнение размера пор образцов. Наименьший диаметр пор принадлежит опилкам – 7,38 нм, средний размер пор из рассматриваемых образцов имеет уголь марки Д (11,21 нм), а флюорит – размер пор 16 нм. Каждый из образцов имеет кроме капиллярной влаги свободную поверхностную влагу, которая удаляется с меньшими энергетическими затратами. По классификации форм связи влаги с материалом, образцы, исследуемые в работе, имеют кроме поверхностной, механическую связь влаги с материалом в микрокапиллярах и макрокапиллярах

3. Кроме этого, удаление влаги при сушке зависит от краевого угла смачивания. Уголь ближе относят к гидрофобным материалам (краевой угол

смачивания  $67\pm 3^\circ$ ), древесина традиционно относится к гидрофильным материалам, имеющая небольшой краевой угол смачивания ( $30\pm 2^\circ$ ), флюориты также смачиваемы и занимают для исследуемых образцов промежуточное состояние ( $38\pm 4^\circ$ ). Чем больше гидрофильность, тем меньшую энергию необходимо подвести для удаления влаги. Противоположное направление действия связано с гидрофобностью.

4. Процесс удаления поверхностной влаги древесины продолжался почти 33 минуты против 16 минут для флюорита. Полагаем, что это связано с большей теплоемкостью древесины, чем флюорита.

5. Если рассматривать кривые сушки по времени удаления влаги до конечной влажности 0,5%, то можно свидетельствовать, что удаление влаги из древесины и флюорита, происходит примерно за 90 мин. В то же время, более высокий краевой угол смачивания угля марки Д способствует увеличению времени удаления капиллярной влаги до конечной 0,5%, которая составила 150 минут. Из этого следует, что наиболее затруднительно влага удаляется из угля и это требует значительных энергетических затрат.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024 г. (FZES-2024-0001).

### Список литературы:

1. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков // Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.: ил.
2. Томина Е.В., Дмитренко А.И., Жужукин К.В. Использование наноразмерного ZnO в составах для защитной обработки древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 4 (388). С. 173-184.
3. Плаксин И.Н., Чаплыгина Е.М. Флотационное обогащение несульфидных минералов с применением газов // М.: Изд-во АН СССР, 1962. 135 с.
4. Усанина А.С., Архипов В.А., Палеев Д.Ю., Патраков Ю.Ф. Влияние химического состава углей на смачиваемость их поверхности // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 3 (84). С. 101-102.
5. Гува А. Я. Краткий теплофизический справочник / А.Я. Гува. — Новосибирск : Сибвузиздат, 2002. — 299 с.; 22. — ISBN 5-94292-009-5.