

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПОДСОЛНЕЧНИКА

А.А. Жилин, А.А. Елгин

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН им. С.А. Христиановича  
630090, Новосибирск, Россия  
ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет водного транспорта"  
630099, Новосибирск, Россия*

В процессе переработки семян подсолнечника в подсолнечное масло исходное сырье проходит целый ряд технологических этапов, при этом часть сырья преобразуется в конечный продукт масло, а часть остается в виде отходов. Полученное подсолнечное масло является основным коммерческим продуктом приносящим прибыль. В то время как отходы производства необходимо утилизировать, что приводит к удорожанию основной продукции. Удешевления основной продукции достигается переработкой отходов производства и последующее использование полученных побочных продуктов в животноводстве и сельском хозяйстве. Таким продуктом является кек, который получается в результате переработки жмыха подсолнечника. Кек является биологическим материалом, содержащим около 80 % влаги, что затрудняет его хранение и транспортировку без потери качества. Для сохранения всех полезных качеств и свойств кека необходимо значительно уменьшить содержание влаги, это позволит значительно уменьшить вес и объем конечного продукта.

Традиционно для осушения кека используется термо-конвективный подход, который основан на подводе к осушаемому материалу горячего осушенного потока воздуха. В данном исследовании для сушки кека предлагается применение альтернативного подхода, основанного на помещении осушаемого материала в высокоинтенсивный акусто-конвективный поток. Данная технология показала значительную интенсификацию процесса экстракции влаги из различных пористых биоматериалов, таких как мясо [1], рис [2], кедровый орех [3] и неорганических, в частности – зернистый силикагель [4], древесина [5] и т.д. Одним из основных достоинств данной технологии является отсутствие нагрева осушаемого материала, т.е. сушка протекает при комнатной температуре.

**Термо-вакуумная сушка.** Прежде чем приступить к исследованию динамики процессов тепло-массопереноса в кеке подсолнечника необходимо знать его первоначальную влажность. Для этого были подготовлены три контрольные порции, с различными начальными массами, которые отличались приблизительно в два и четыре раза от начальной массы первого образца, которые помещались в вакуумный сушильный шкаф с температурой 50 °С. Через заданные временные промежутки осушаемые образцы кратковременно извлекались из сушильной камеры для контрольного взвешивания и определения текущей влажности. Эксперимент прекращался, когда текущая влажность образцов имеющих большую первоначальную массу не станет выше текущей влажности образцов имевших меньшую первоначальную массу. Общая продолжительность сушки составила 24 часа.

В результате проведенного исследования по термо-вакуумной сушке образцов кека подсолнечника, было определено, что абсолютная начальная влажность исследуемого материала составила  $W = 313,06 \%$ , а относительная  $w = 75,79 \%$ .

**Акусто-конвективная сушка.** Эксперименты по акусто-конвективной сушке кека подсолнечника проводились на акусто-конвективной сушильной установке (АКСУ) ИТПМ СО РАН. Принцип работы АКСУ основан на газоструйном излучателе Гартмановского типа. Пуск АКСУ проводился без осушаемого материала. После выхода уста-

новки на режим проводилась регистрация параметров сформированного акусто-конвективного потока в рабочей части АКСУ. После этого происходила загрузка заранее подготовленных образцов из кека подсолнечника. Статическое давление в форкамере и температура рабочего потока в тракте АКСУ для всех проводимых экспериментов были постоянными и составляли 4,7 атм. и 18,8 °С, соответственно. Эксперимента на АКСУ проводилась на трех режимах, которые устанавливались с помощью изменения глубины резонатора  $l = 300, 80$  и  $0$  мм. *Режим 1* при  $l = 300$  мм имеет частоту  $f = 270$  Гц, интенсивность  $I = 182$  дБ. *Режим 2* при  $l = 80$  мм характеризуется  $f = 790$  Гц,  $I = 175$  дБ. *Режим 3* при  $l = 0$  мм не имеет резонирующей частоты, при этом  $I = 130$  дБ.

Обработанные результаты экспериментов по динамике экстракции влаги из образцов кека подсолнечника при акусто-конвективном воздействии на них при разных режимах работы АКСУ представлены на рис. 1. На представленном рисунке видно, что за 30 мин. сушки потоком с рабочими параметром: *режим 3*  $W$  уменьшилась на 94 %, а  $w$  на 7 %; *режим 1* –  $W$  уменьшилась на 117 %, а  $w$  на 10 %; *режим 2* –  $W$  уменьшилась на 185 %, а  $w$  на 20 %. Таким образом, при озвучивании осушаемого материала потоком с частотой 790 Гц происходит выход влаги вдвое большего объема, чем при озвучивании с частотой 270 Гц и втрое, если резонирующая частота в рабочем потоке отсутствует. Сравнение результатов озвучивания при частоте 270 Гц и без резонирующей частоты, показывает, что режим с резонирующей частотой 270 Гц позволяет извлечь воду в полтора раза быстрее, чем в фоновом режиме.

Полученный экспериментально результат подтверждает, что наличие резонанса позволяет интенсифицировать процесс экстракции влаги из пористых материалов, при этом значение резонирующей частоты оказывает существенное влияние на скорость выхода влаги. Таки образом, правильно подбирая резонирующую частоту рабочего потока можно увеличить производительность процесса акусто-конвективной сушки кека подсолнечника, как в данном случае почти в два раза, при этом энергозатраты остаются неизменными. В том случае если в рабочем акусто-конвективном потоке резонанс отсутствует или пропадает по каким-то причинам, то различие в динамике сушки становится еще более значимым, в данном исследовании к 30 минуте оно составляет около 3 раза.

**Термо-конвективная сушка.** Традиционно для сушки кека подсолнечника используется термо-конвективный подход, который основан на подводе тепла к осушаемому материалу, поэтому возникает необходимость в сопоставлении результатов по динамике сушки акусто-конвективным способом с традиционным. Для этого был создан экспериментальный стенд, который позволил провести эксперименты по сушке кека подсолнечника термо-конвективным потоком на двух режимах: *режим 1* характеризуется температурой 74,2 °С; *режим 2* – 127 °С.

Обработанные результаты весовых экспериментов для обоих режимов сушки представлены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что за 30 мин. термо-конвективной сушки на *режиме 1* абсолютная влажность уменьшилась на 28 %, а относительная на 2 %, на *режиме 2*  $W$  уменьшилась на 113 %, а  $w$  на 9 %. Полученные экспериментальные результаты подтверждают, что увеличение температуры осушающего потока выше температуры кипения воды приводит к смене механизма экстракции влаги из пористого материала. Таким образом, если температура осушающего термо-конвективного потока ниже температуры кипения жидкости, то реализуется капельный режим экстракции влаги, иначе паровой.

**Математическое описание полученных экспериментальных данных** по экстракции влаги из кека подсолнечника осуществлялось с помощью линейного релаксационного уравнения, с соответствующим начальным условием

$$\frac{dW}{dt} = \frac{W_K - W}{\tau}, \quad \text{при } t=0 \quad W = W_0, \quad (1)$$

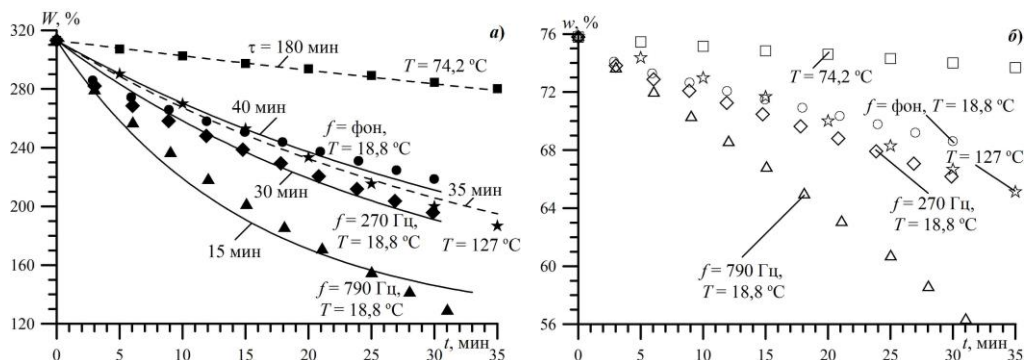


Рис. 1. Динамика экстракции влаги из кека подсолнечника на разных режимах акусто- (круг, ромб и треугольник) и термо- (квадрат, звезда) конвективной сушки (точки – эксперимент, линии – теория)

где  $W_0$ ,  $W_K$  – начальная и условная конечная равновесная влажность,  $\tau$  – время релаксации экстракции влаги. Данная задача Коши (1) имеет аналитическое решение в виде:

$$W = W_K + (W_0 - W_K)e^{-(t/\tau)}. \quad (2)$$

Результаты обработки полученных экспериментальных данных нанесены на рис. 1. Здесь сплошными и пунктирными линиями представлены результаты численных расчетов, полученные с помощью выражения (2) при оптимально подобранных значениях  $\tau$  для акусто- и термо-конвективного режима сушки соответственно. Самый быстрый процесс экстракции влаги, реализованный при акусто-конвективной сушке на частоте 790 Гц и температуре  $18,8^\circ\text{C}$ , имеет минимальное значение времени релаксации 15 мин. Следующий по эффективности режим акусто-конвективной сушки на частоте 270 Гц и температуре  $18,8^\circ\text{C}$  имеет значение времени релаксации в двое большее, т.е. 30 мин. На третьем месте расположился режим термо-конвективной сушки при температуре  $127^\circ\text{C}$ , он обладает характерным временем релаксации 35 мин. Четвертым по эффективности является фоновый режим акусто-конвективной сушки при температуре  $18,8^\circ\text{C}$  здесь  $\tau = 40$  мин. Самый медленным из рассмотренных в исследовании процессов по экстракции влаги из кека подсолнечника реализуется при термо-конвективной сушке на  $74,2^\circ\text{C}$  здесь  $\tau = 180$  мин (3 ч).

Сопоставление термо-конвективного и акусто-конвективного способа сушки показало, что за 30 минутный интервал из образцов подвергающихся сушке в АКСУ при частоте рабочего потока 790 Гц и комнатной температуре выходит влаги в два раза больше, чем при термо-конвективной сушке с температурой рабочего потока  $127^\circ\text{C}$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 17-48-540805.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жилин А.А., Федоров А.В. Исследование акусто-конвективной сушки мяса // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 2. – С. 316 - 325.
2. Федоров А.В., Жилин А.А. Математическое моделирование процесса экстракции влаги из зерен риса // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – Т. 55, № 6. – С. 127 - 131.
3. Жилин А.А., Федоров А.В. Акусто-конвективная сушка кедрового ореха // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 879 - 886.
4. Жилин А.А., Федоров А.В., Коробейников Ю.Г. Исследование процессов пропитки и сушки зернистого силикагеля // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, № 5. – С. 897 - 906.
5. Жилин А.А., Федоров А.В., Фомин В.М., Коробейников Ю.Г. Математическое моделирование механизма акустической сушки пористых материалов // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44, № 5. – С. 102 - 117.