

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ЭКСТРАКЦИИ ВЛАГИ ИЗ ВОЛОКНИСТОГО КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

А.А. Жилин, А.В. Федоров

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

Основной задачей пищевой промышленности и сельского хозяйства является сохранение произведенных продуктов питания. В данной работе в качестве исследуемого волокнистого капиллярно-пористого материала было взято мясо говядины. Мясо является стратегическим продуктом для человека, так как в нем содержатся полезные питательные вещества, такие как животный жир, белок, витамины и микроэлементы. Мясо состоит из мышечной ткани, которая представляет собой набор мышечных волокон, а мышечное волокно является клеткой с длиной не более 15 см и диаметром от 10 до 100 мкм. В мышечных тканях свежего мяса может содержаться от 70 до 75 % воды. Большое содержание влаги в мясе не позволяет осуществлять его длительное сохранение без консервации. Для предотвращения порчи и сохранения полезных питательных свойств в мясе необходимо понизить содержание влаги в нем до 15 %. Традиционно для этого используется: тепловая сушка (конвективная, кондуктивная или сублимационная), охлаждение и замораживание. В результате этого затрачивается большое количество энергии и времени, теряется качество и полезные свойства продукта. Известно, что нагрев мяса до температур выше 45 °С приводит к разложению белков и разрушению витаминов, а это в свою очередь приводит к снижению гидрофильности и последующей неспособности восстанавливаться при увлажнении.

В данном исследовании для сушки мяса предлагается применить акусто-конвективный способ, основанный на эффекте Гартмана. Основным достоинством предлагаемого подхода является проведение сушки без повышения температуры осушаемого материала, что позволяет сохранять белок, витамины и другие его полезные свойства. Эффективность данного метода для сушки капиллярно-пористых материалов была показана ранее для сушки таких материалов как силикагель [1], древесина [2] и ряда других.

Определение начальной влажности. До начала экспериментов по исследованию динамики сушки мяса была определена его начальная влажность. Для этого из одного большого куска продукта было приготовлено три небольших образца с разной начальной массой. Подготовленные образцы помещались в вакуумный сушильный шкаф СНВС-4,3.4,3.4,9/3U24n. Регулятор нагревательного элемента был установлен в выключенное положение, при этом температура в шкафу на протяжении всего эксперимента колебалась в интервале 26 ÷ 27 °С. Общая продолжительность сушки в вакуумном сушильном шкафу составила около 25 часов. По завершению эксперимента была зафиксирована масса образцов мяса в абсолютно сухом состоянии. Регистрация массы образцов проводилась с помощью лабораторных весов AND EK 610i с максимально возможным весом 600 грамм и ценой деления 0,01 г. По массе абсолютно сухих образцов мяса была определена начальная абсолютная ($W = 256,65 \%$) и относительная ($w = 71,96 \%$) влажность исследуемого материала. Полученное значение влажности принималось за начальное W_0 (w_0) во всех последующих экспериментах с мясом.

Сушка мяса акусто-конвективным способом. Эксперименты по сушке мяса акусто-конвективным способом проводились на лабораторной модельной установке ИТПМ СО РАН. Схема и принцип работы акусто-конвективной сушильной установки (АКСУ) рассмотрены ранее в работе [3]. Все опыты проводились в помещении с температурой

19,5 °С, влажностью 72,2 % (12,1 г/м³) и температурой точки росы 14,4 °С. Регистрация температуры и влажности окружающей среды и параметров потока в рабочей части АКСУ осуществлялась с помощью измерителя влажности и температуры ИВТМ-7 МК-С.

Подготовленные образцы испытуемого материала помещались в цилиндрический контейнер, изготовленный из металлической сетки с размером ячейки на просвет 0,7×0,7 мм и толщиной проволоки 250 мкм. В качестве материала сетки использовалась нержавеющая сталь. После загрузки контейнера он закрывался и крепился к подложке с помощью проволоки. Подложка с помощью системы крепления надежно фиксировалась в рабочей части АКСУ.

Запуск АКСУ осуществлялся без осушаемого материала. После выхода установки на режим проводилась регистрация параметров сформировавшегося акусто-конвективного потока в рабочей части АКСУ. Осушающий поток имеет температуру 12,4 °С, влажностью 9,8 % (1,6 г/м³) и температурой точки росы -2,5 °С. В зависимости от цели проводимого исследования параметры рабочего потока менялись, но во всех видах экспериментов проводимых на АКСУ, постоянным поддерживалось давление в форкамере $P_0 = 5$ атм. Эксперименты проводились на трех режимах работы АКСУ со следующими амплитудно-частотными характеристиками потока: 1) при глубине резонатора $l = 300$ мм поток имеет частоту 270 Гц, интенсивность 184 дБ; 2) при $l = 80$ мм – частота 860 Гц, интенсивность 178 дБ; 3) при $l = 0$ мм – нет ярко выраженной частоты, а интенсивность 138 дБ.

Подготовленные контейнеры с образцами мяса загружались в рабочую часть действующей АКСУ с установившимся осушающим потоком. Через фиксированные интервалы времени контейнеры с образцами извлекались из сушильной установки и взвешивались. Полученные после обработки результаты по динамике экстракции влаги из мяса представлены на рис. 1 как для образцов с первоначальным продольным, так и поперечным расположением волокон относительно рабочего потока.

Сушка мяса термо-конвективным способом. Для сопоставления результатов по динамике сушки акусто-конвективным способом с традиционным основанным на подведении тепла к осушаемому материалу была выполнена серия экспериментов по сушке мяса термо-конвективным потоком. Для этого был изготовлен экспериментальный стенд. В качестве источника теплового потока использовалась тепловая пушка ЭТВ-4,5/220 Т с мощностью нагрева 4,5 кВт и скоростью потока 7,6 м/с. На тепловой пушке был установлен режим с минимальной температурой теплового потока. Параметры потока на выходе из тепловой пушки составляли: температура 51,6 °С, влажность 14,3 % или 13,1 г/м³, температура точки росы 16,3 °С. Исследуемые образцы мяса помещались в центр теплового потока истекающего из тепловой пушки. Через определенные интервалы времени образцы извлекались из теплового потока и взвешивались. Эксперимент по ТКС продолжался до тех пор, пока потери влаги за пятиминутный интервал времени не становились менее 0,5 % от начальной массы осушаемого образца. Результаты проведенных экспериментов по динамике ТКС образцов мяса при продольном и поперечном расположении волокон по отношению к набегающему термо-конвективному потоку представлены на рис. 2. Как видно, сушка образца с продольным расположением волокон происходит быстрее, чем образца с поперечным расположением волокон.

Обсуждение экспериментальных результатов. Проведем сравнение результатов, полученных в экспериментах по АКС мяса на разных режимах и сопоставим их с ТКС. На рис. 3 нанесены результаты по АКС мяса при трех рассмотренных ранее режимах и термо-конвективным потоком в течении 35 мин. Полученные зависимости для сушки при частоте 860 Гц с интенсивностью 178 дБ и при обтекании преграды с интенсивностью 138 дБ показывают практически одинаковый результат. В тоже время процесс сушки при

частоте 270 Гц с интенсивностью 184 дБ имеет большую скорость, так для представленного случая за 30 мин. влажность уменьшилась на 55,1 %, против 43,8 % и 45,9 % для режима с интенсивностью 178 дБ и 138 дБ, соответственно. Результаты по динамике сушки мяса термо-конвективным способом качественно отличаются от акусто-конвективного. В первые моменты времени ($t < 10$ мин.) потеря влаги при ТКС протекает медленнее, чем при АКС, затем динамика обоих способов сушки сравнивается ($t = 10 \div 20$ мин.) и на последнем интервале времени ($t > 20$ мин.) динамика потери влаги при ТКС начинает преобладать на АКС. Отметим, что количество потерянной влаги при ТКС и АКС сопоставимо. Таким образом, динамика сушки образцов с поперечным расположением волокон относительно рабочего потока с температурой 12,4 °С при АКС и с температурой 51,6 °С при ТКС является подобной.

Математическое описание экспериментальных данных. Для проведения математической обработки полученных в экспериментах кинетических кривых экстракции влаги привлекается линейное релаксационное уравнение с соответствующим начальным условием. Аналитическое решение релаксационного уравнения имеет вид:

$$W_0 = W_K + (W_0 - W_K) \times \exp(-t / \tau),$$

где W_0 – начальная влажность, W_K – условная конечная равновесная влажность, τ – время релаксации экстракции влаги.

На рис. 1 сплошными линиями представлены результаты численных расчетов, полученные с помощью полученного выражения при оптимальных значениях τ . Здесь можно заметить, что практически для всех режимов АКС удовлетворительное согласование предлагаемой математической модели с экспериментальными данными по динамике экстракции влаги из мяса достигается при $\tau = 10$ мин. Исключением является случай сушки мяса с продольным расположением волокон при интенсивности 138 дБ без явно выраженного максимума по частоте, здесь $\tau = 8$ мин.

Полученные времена релаксации процесса сушки мяса сопоставимы со значениями, полученными в работе [4] для АКС зерен кедрового ореха, где характерное время релаксации для скорлупы кедрового ореха составляло 7,5 мин, для ядер – 13 мин, а для зерен – 20 мин. Авторы работы [5] моделирующие волокнистое пористое тело в виде сборки микро-капиллярных трубок получили времена релаксации равные 9 и 6 минутам при продольном и поперечном расположении капилляров по отношению к набегающему потоку, соответственно. Таким образом, полученные времена релаксации для АКС волокон мяса хорошо коррелируют со значениями, полученными в других работах.

С помощью предлагаемой математической модели были обработаны экспериментальные данные по сушке мяса термо-конвективным способом. На рис. 2 сплошной и пунктирной линиями нанесены результаты численных расчетов, выполненных при $\tau = 30$ мин для продольного волокна и $\tau = 45$ мин для поперечного.

Выводы

1. Экспериментально изучена динамика экстракции влаги из образцов мяса при АКС и ТКС.
2. Проведенные эксперименты показали, что:
 - при ТКС наблюдается значительное увеличение скорости экстракции влаги в образцах с продольным размещением волокон относительно набегающего потока, по сравнению со случаем поперечного волокна;
 - при АКС влияние положения волокон мяса относительно рабочего потока либо отсутствует, либо является не существенным.
3. Полученные количественные данные по динамике экстракции влаги из поперечных волокон мяса при двух способах сушки показали, что для достижения схожей производительности по сушке температура термо-конвективного потока должна составлять 52 °С, в то время как температура осушающего акусто-конвективного потока 12 °С.

4. Для описания динамики экстракции влаги предложена простая релаксационная модель, со временем релаксации $8 \div 10$ мин удовлетворительно описывающая экспериментальные данные по АКС мяса, а для ТКС 30 и 45 мин для продольного и поперечного расположения волокон, соответственно.

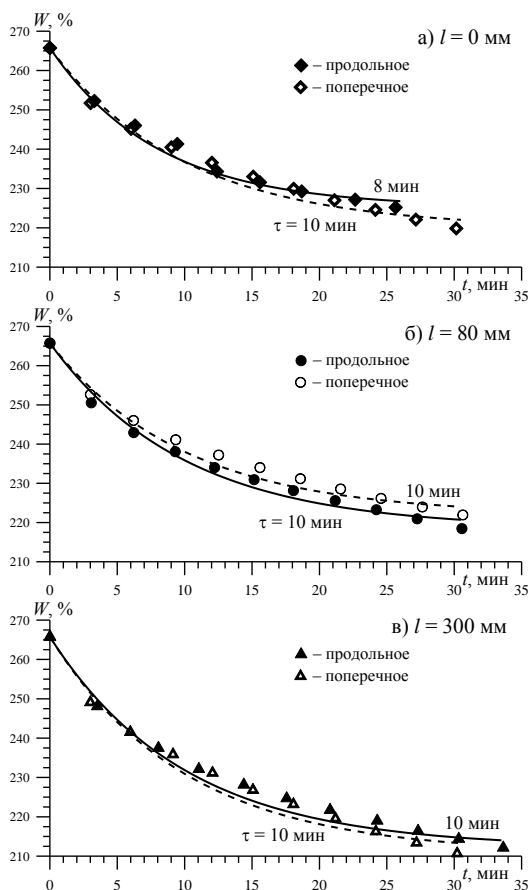


Рис. 1. Динамика экстракции влаги при АКС.

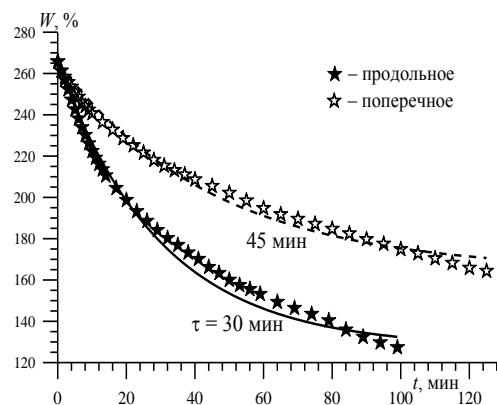


Рис. 2. Изменение влажности при ТКС.

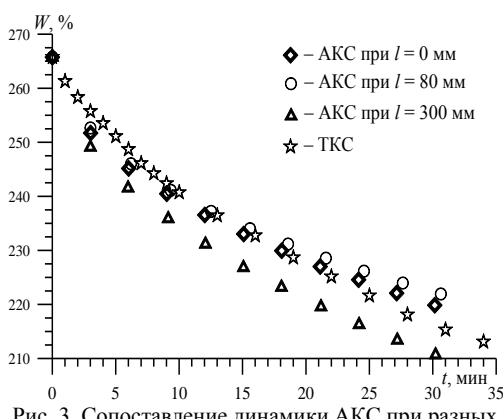


Рис. 3. Сопоставление динамики АКС при разных режимах и ТКС мяса для поперечных волокон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Глазнев В.Н., Коробейников Ю.Г. Эффект Гартмана. Область существования и частоты колебаний // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42, № 4. – С. 62 – 67.
4. Жилин А.А., Федоров А.В. Акусто-конвективная сушка кедрового ореха // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 879 – 886.
5. Коробейников Ю.Г., Федоров А.В. Об экстракции воды из капиллярного образца в акустическом поле // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 1. – С. 7 – 10.