

Анализ существующих типов оборудования и технологий сушки.

Аспирант Кунилова Т.М.

Представляется целесообразным изучить и реализовать на практике возможность наиболее экономичного с энергетической точки зрения совмещения двух физических механизмов сушки (конвекционного и инфракрасного или микроволнового) и достижения на этой основе дальнейшего существенного снижения энергоемкости процесса обезвоживания.

Ключевые слова: сушка, оборудование, конвекция, инфракрасное, микроволновое.

Во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства приходится сталкиваться с необходимостью снижения влажности различных продуктов и материалов.

Применительно к сельскому хозяйству и пищеперерабатывающим отраслям промышленности это связано с общей задачей повышения сохраняемости плодоовощной и прочей сельскохозяйственной продукции, для чего в последние десятилетия были созданы многочисленные технологии сушки различных продуктов (доведение их до такой влажности, при которой содержащиеся в них сахара начинают играть роль консервантов). Причем эти технологии находят все более широкое применение [1,2,3,4], наблюдается формирование сушильной отрасли промышленности и увеличение производства сушеных овощей и фруктов.

При любом масштабе использования сушильных технологий принципиальной представляется реализация ряда технико-экономических параметров, таких как минимально возможная энергоемкость процесса, максимальная однородность сушки, минимальное время выхода на заданную влажность и некоторых других характеристик обезвоживания. Эти параметры могут быть обеспечены грамотным подходом к выбору наиболее подходящих к данной конкретной ситуации базовых физических процессов, приводящих к обезвоживанию продуктов, соответствующих им технологий сушки и, наконец, за счет создания оборудования, на котором указанные процессы и технологии могут быть реализованы.

К настоящему времени существует большое количество различных технологий сушки (обезвоживания): естественная сушка, аэрационная [2], конвекционная [2,3,4,5,6,7], сушка в псевдокипящем слое [2,8], инфракрасная сушка [3,9,10,13], микроволновая [1,3], сублимационная [3] и т.д. Проведем сравнительный анализ этих технологий, базирующийся на использовании относительно небольшой системы параметров (критериев):

производительности, энергоемкости, скорости сушки, сохраняемости в процессе сушки полезных веществ и витаминов и т.д. Из результатов его с очевидностью следует, что наиболее широко используемые в сельскохозяйственной, перерабатывающей и других отраслях промышленности технологии и оборудование, основанные на конвекционных механизмах обезвоживания [2], не обеспечивают достаточно высокого качества получаемой продукции и характеризуются большой энергоемкостью процесса. Указанные недостатки конвекционной сушки обусловлены спецификой взаимодействия горячего воздуха (либо иного теплоагента) с высушиваемыми объектами на различных этапах процесса сушки. На начальном этапе сушильного процесса взаимодействие протекает достаточно эффективно, энергоемкость процесса мала, а скорость сушки достаточно высока. Однако по мере высыхания продукта и связанного с этим снижения его тепло- и массопроводящих характеристик все большая доля тепловой энергии не проникает в глубь высушиваемых продуктов, а переизлучается в пространство. Энергоемкость процесса возрастает, время сушки многократно увеличивается, возникают локальные перегревы продукта (в первую очередь, его поверхностных слоев). Это напрямую отражается на качестве готовой продукции. Так, для пищевых продуктов увеличение времени и температуры процесса сушки приводит к потере пищевой ценности продукта (снижению сохраняемости содержащихся в нем полезных веществ и витаминов), ухудшению его органолептических характеристик (локальным изменениям цвета, слипанию отдельных частиц и т.д.)

Особенно большое влияние указанной специфики процесса конвекционной сушки на технико-экономические параметры процесса и качество конечной продукции наблюдается при обезвоживании продуктов с невысоким исходным влагосодержанием. Так, например для таких пищевых продуктов, как высококрахмальные сорта картофеля, чеснок, острые сорта лука, у которых исходное содержание влаги не превышает 250-300%, ограничения, свойственные конвекционным методам сушки, проявляются практически с самого начала процесса обезвоживания. Полученные такими методами сушеные продукты принципиально непригодны для последующего использования в качестве ингредиентов детского и диетического питания, имеют ограниченное применение в консервной и других отраслях перерабатывающей промышленности.

Большая энергоемкость процесса приводит в целом по сушильной отрасли к неоправданным потерям энергии, повышенному потреблению жидких и газообразных видов топлива, энергия сжигания которых используется в процессах конвективной сушки. Следствием последнего является также и снижение экологической чистоты как техпроцесса сушки, так и собственно получаемых с помощью конвекционных технологий сушеных овощей и фруктов.

Близкие по сущности проблемы возникают при использовании менее распространенных, но имеющих подобные же недостатки технологий сушки

в псевдокипящем слое и других, основанных (как и конвекционная сушка) на поверхностном обогреве высушиваемых продуктов.

Очевидно, что современные и обеспечивающие высокое качество конечного продукта технологии сушки должны опираться на иные физические механизмы обезвоживания, на физические процессы, ход которых не так сильно связан с изменяющимися в процессе сушки собственными свойствами продуктов (в первую очередь, с их тепло- и массопроводностью).

Весьма перспективно в этом плане использование ИК- сушки и микроволновой сушки [9,10,11,13], ввиду ряда важных отличий от классических методов нагрева. Во-первых, не требуется наличия теплоносителя, способствующего загрязнению обрабатываемого материала; отсутствуют взрывоопасные концентрации и потери материала за счет уноса. Во-вторых, материал не перегревается вблизи теплопередающей стенки; тепловыделение происходит в объеме материала, и его температура выше, чем температура стенок аппарата. В-третьих, оптимальными конструкционными материалами являются второпласт, кварцевое стекло и т.п., которые обеспечивают высокую стерильность процесса, но создают серьезные затруднения при подводе тепла обычными методами. В-четвертых, интенсивность нагрева не зависит от агрегатного состояния материала – только от его оптических, диэлектрических свойств и напряженности СВЧ-поля.

Для сушки тонких слоев очень эффективно использование ИК-нагрева [13]. В этом случае интенсификация сушки увеличивается в 1,5-2,0 раза при снижении энергозатрат в 1,5 раза [13].

В наибольшей мере достоинства ИК- и СВЧ- сушки проявляются в диапазоне малых влажностей. Для продуктов с высоким исходным уровнем влажности зачастую представляется целесообразным объединять технологии конвекционной и ИК- или СВЧ- сушки, в единый последовательный сушильный процесс, в котором каждый из составляющих его физических механизмов «работает» при близких к оптимальным параметрам взаимодействия с высушиваемым объектом.

В настоящее время существует достаточно большое количество различных методов искусственного обезвоживания (сушки) продуктов растительного происхождения и соответствующих им конструкций сушильного оборудования. При создании последних необходимо придерживаться определенных требований. Прежде всего, конструкция оборудования должна обеспечивать равномерный нагрев и сушку продукта при надежном контроле его температуры и влажности. Кроме того, сушильное оборудование должно иметь возможно меньшую металлоемкость. И, наконец, современное сушильное оборудование должно быть универсальным в части возможности сушки различных материалов.

Установки для сельскохозяйственной продукции классифицируют по целому ряду признаков [3]:

1. по способу подвода тепла к влажному материалу: конвекционные, кондуктивные (контактные), радиационные (с инфракрасным излучением или с токами высокой (ТВЧ) и сверхвысокой (СВЧ) частоты);
2. по давлению воздуха в сушильной камере: атмосферные, вакуумные, сублимационные;
3. по характеру работы: аппараты периодического и непрерывного действия;
4. по виду сушильного агента: аппараты, использующие нагретый воздух, дымовые газы, смесь воздуха с дымовыми газами или перегретый пар;
5. по циркуляции сушильного агента: установки с естественной циркуляцией и с принудительной циркуляцией при помощи центробежных и осевых вентиляторов;
6. по характеру движения сушильного агента относительно материала: прямоточные (при одинаковом направлении сушильного агента и материала), противоточные (при противоположном движении сушильного агента и материала), с пронизыванием слоя материала потоком сушильного агента;
7. по способу нагрева сушильного агента: сушильные установки с паровыми, огневыми, электрическими калориферами;
8. по кратности использования сушильного агента: с однократным и многократным использованием нагретого воздуха в различных вариантах;
9. по виду объекта сушки: для твердых (крупных, мелких, пылевидных), жидких и пастообразных материалов;
10. по конструктивным признакам: тоннельные, камерные, шахтные, коридорные, барабанные, вальцевые и др.

По важнейшему классификационному признаку – способу подвода тепла – сушилки бывают: конвекционные (высушиваемый материал омывается потоком предварительно нагретого сушильного агента), контактные (непосредственный контакт высушиваемого материала с нагреваемой поверхностью), сублимационные (удаление влаги в замороженном состоянии под вакуумом), радиационные (высушивание под действием инфракрасного излучения), высокочастотные (удаление влаги под действием электрического поля высокой частоты).

1. Самое широкое промышленное применение получили конвекционные сушилки различных конструкций (камерные, барабанные, пневматические, ленточные, с кипящим слоем и пр.)

В основном варианте конвекционной сушилки сушильный агент, предварительно нагретый в калорифере до максимально допустимой температуры, движется через рабочую камеру, непосредственно соприкасаясь с высушиваемым материалом. Отличительная особенность этого варианта – однократный нагрев и однократное использование сушильного агента.

В камерной сушилке основным узлом является сушильная прямоугольная камера, внутри которой помещается высушиваемый продукт. Камерные сушилки непрерывного действия неудобны в эксплуатации, имеют низкие технико-экономические показатели и трудно поддаются

автоматизации, поэтому в настоящее время используются камерные сушилки периодического действия. сушка осуществляется либо чистым нагретым воздухом, либо смесью топочных газов с воздухом. Сушилки бывают двухкамерные, коридорного типа, шкафные.

Барабанные сушилки представляют собой цилиндр с внутренней насадкой для пересыпания и перемешивания материала с целью улучшения его контакта с сушильным агентом. Барабан устанавливается либо горизонтально, опираясь бандажми на опорные ролики, либо с небольшим наклоном (0,5-0,3°). Известны сушилки с диаметром барабана до 3500 мм и длиной его до 3,5-7,0 диаметров. Барабан медленно вращается (0,5-0,8 об/мин) [12].

Пневматические сушилки состоят из одной или нескольких последовательно соединенных вертикальных труб. Высушиваемый материал перемещается по этим трубам потоком сушильного агента, скорость которого превышает скорость движения наиболее крупных частиц (обычно 10-40 см/с). Вследствие кратковременности контакта (1-5 с) эта сушилка пригодна для термически нестойких материалов даже при высокой температуре сушильного агента.

В ленточных сушилках высушиваемый материал движется по бесконечной ленте (или на нескольких последовательно расположенных лентах), натянутой между ведущим и ведомым барабанами. Сушка осуществляется горячим воздухом или топочными газами, движущимися вдоль лент или в перекрестном токе. В настоящее время наиболее известны ленточные сушилки TS-P-5 (фирмы ZER), S-5-5 и S-10-10 (фирмы Sandvik) КСК-45 (Шебекинский завод, Россия) и др.

Общий для всех перечисленных выше установок принцип конвекционной сушки состоит в продувке слоя продуктов подогретым воздухом либо иным теплоагентом. Скорость испарения (масса испаренной в единицу времени влаги) $d\chi/dt$ с поверхности S зависит от соотношения парциального давления пара в окружающей среде h , парциального давления насыщенного пара в пограничном слое продукта H и общего барометрического давления B следующим образом:

$$\frac{1}{S} \cdot \frac{d\chi}{dt} \approx \frac{H-h}{B}, \quad (1)$$

где S – коэффициент испарения, обусловленный вязкостью и другими параметрами воздуха [3]. При низких температурах неизбежна малая скорость сушки. при температурах порядка 80-90°C, еще не чреватых серьезными химическими изменениями в продукте, величина $H-h$ в выражении (1) многократно увеличивается по сравнению с этой величиной при комнатной температуре, и процесс идет эффективно от влажностей порядка 400-800% (влажность здесь задается как отношение массы влаги в продукте к массе его сухого остатка) до примерно 100-150%, затем скорость сушильного процесса резко падает, а его энергоемкость столь же стремительно возрастает. Физически это обусловлено быстрым ухудшением тепло- и массообмена в продуктах по мере их высыхания. В результате

интенсивный контакт теплоносителя с поверхностью продукта не приводит в сколь-либо заметному разогреву внутренних слоев продукта, и его неиспользованная энергия через теплоизоляцию сушильного оборудования и каналы для отвода испаренной влаги уходит на обогрев окружающей среды. За счет финишного участка сушильного процесса ($150\% > \chi > \chi_0$, где χ_0 – кондиционная влажность высушенного продукта) энергоемкость процесса конвекционной сушки R для большинства типов сушильного оборудования [1] составляет 0,7-1,1 Вт/кг по испаренной влаге (физическим пределом минимизации энергоемкости сушильного процесса при нормальном барометрическом давлении является величина $R=0,2$ Вт/кг – количество энергии необходимое для разогрева от 20 до 100°C и испарения одного кг воды). Кроме того, в установках, использующих конвекционный метод сушки, имеется, как правило, еще один весьма существенный недостаток: для получения теплоты в них используются пар, жидкое и газообразное топливо, что не позволяет сделать производство экологически чистым.

В сушилке с кипящим (псевдокипящим) слоем достигается интенсивное перемешивание материала, ускоренный тепло- и массообмен, благодаря чему сушильный агент может использоваться при повышенных температурах без значительной потери качества конечного продукта. Сочетая простоту устройства с высокой удельной производительностью и легкостью автоматизации, эти сушилки нашли широкое применение. Наиболее известны сушильные установки такого типа, выпускаемые московским предприятием «Биотех». Параметрический ряд этих сушильных установок с площадью эффективного сечения (продуваемого потоком нагретого воздуха) от нескольких десятков квадратных дециметров до нескольких квадратных метров используется для сушки самых различных продуктов. Сведения об энергоемкости процесса обезвоживания достаточно противоречивы, однако, по имеющимся оценкам [1], она несколько ниже, чем в классических конвекционных сушилках, и составляет 0,6-0,9 Вт/кг.

Специфика процесса обезвоживания в данных сушилках заключается в том, что нагретый воздух движется в вертикальном направлении (снизу вверх) с такой скоростью, что силы давления воздуха на частицы продукта уравновешивают действующие на эти частицы гравитационные силы. В результате каждая частица как бы «парит» независимо от других и все элементы ее поверхности одинаково эффективно взаимодействуют с потоком нагретого воздуха, то есть вся площадь ее поверхности является площадью испарения, что несколько уменьшает энергоемкость процесса (по сравнению с упомянутыми выше ленточными сушилками). Однако тепло- и массообмен между внешней поверхностью частиц и их внутренними областями в этой технологической схеме ничем не отличается от типичного для конвекционной сушки, что и приводит к многократному увеличению энергоемкости и снижению скорости сушки при малых влажностях продукта и соответственно к увеличению энергоемкости процесса.

2. Контактные (например, вальцовые) сушилки используются для сушки материалов под атмосферным давлением или под вакуумом. Бывают одно- и

двухвальцовые сушилки. Основной их частью являются медленно вращающиеся (2-10 об/мин) вальцы, в которые через полуу цапфу поступает греющий пар. Высушиваемый материал поступает на вальцы, налипает на их поверхность тонким слоем (1-2 мм), высушивается и срезывается ножом. Коэффициент теплоотдачи при этом способе значительно выше, чем при конвекционной сушке, и составляет 170-180 Вт/(м²·К) (для типовой конвекционной 3-10 Вт/(м²·К)). Однако это не приводит к существенному снижению теплоемкости процесса, так как основные проблемы обоих методов обусловлены теплообменом не на границе материала, а в его внутренних слоях. В целом же контактная сушка имеет весьма ограниченное применение.

3. Сублимационные сушилки используются для сушки пищевых продуктов в замороженном состоянии в условиях глубокого вакуума. Основное количество влаги (75-90%) удаляется при сублимации льда при температуре продукта ниже 0 (остаточное давление 6,65-332,50 Н/м² или 0,05-2,50 мм рт.ст.), и только удаление остаточной влаги происходит при нагреве материала до 40-60°С. При сублимационной сушке отсутствует окислительное действие кислорода воздуха, в результате продукты сушки отличаются высоким качеством, сохраняют питательные вещества, обладают повышенной восстанавливающей способностью, имеют незначительную усадку, сохраняют цвет, имеют пористое строение. С точки зрения сохранения качества сублимационная сушка является наиболее совершенной из всех способов сушки. Однако такие сушилки используются крайне редко вследствие чрезмерной себестоимости производимой с их применением продукции.

4. Инфракрасные сушилки. По типу излучателей ИК-лучей различают терморadiационные сушилки с электрическим и газовым обогревом. Сушилки с электрическим обогревом компактны, просты в обращении и эксплуатации, безынерционны. Однако высокий расход электроэнергии и неравномерность сушки ограничивают их применение. Терморadiационные сушилки с газовыми панельными излучателями более экономичны и обеспечивают более равномерную сушку, чем сушилки с электрообогревом.

Такие типы сушильных ИК-шкафов [13], как «Феруза-Восток» и «Феруза-Фермер» производства предприятия «Феруза» (С.-Петербург), «Икар» и др., используют «обыкновенные» тепловые ТЭНы, фактически служащие для нагрева взаимодействия с продуктом воздуха. В наиболее грамотно спроектированных шкафах этого типа введены вентиляторы, увеличивающие скорость движения нагретого воздуха, что позволяет ему кроме функций теплоагента выполнять еще и функцию выноса испаренной влаги. В более простых – их авторы ограничились естественной конвекцией нагретого воздуха. В целом средняя энергоемкость процессов, реализуемых на таком оборудовании, оценивается на уровне 0,7-1,3 кВт·ч/кг [1]. Недостатком этого способа является необходимость «ручного» перемешивания продуктов на поддонах в ИК-шкафах, без которого имеет место неоднородность сушки и слипание отдельных частиц между собой.

5. Микроволновая сушка. За несколько десятилетий, прошедших с момента появления научных и технических предпосылок для создания аппаратуры и технологий СВЧ-сушки, создано огромное количество различных вариаций установок СВЧ-нагрева. Микроволновые установки или СВЧ - установки – оборудование, работающее в диапазоне от 300МГц до 300 ГГц, что соответствует длине волн от 1м до 1мм. Наибольшее распространение в качестве генератора СВЧ – излучения в микроволновых установках нашли магнетроны на 2450, 2375 МГц и мощностью от 0,5 до 1 кВт. КПД отдельных конструкций магнетронов достигает 85%.

Нагрев материалов в электромагнитном поле СВЧ обусловлен колебательным движением и переориентацией связанных зарядов – диполей – под действием электромагнитного поля СВЧ. Возникающее при этом «внутреннее трение» диполей друг о друга приводит к «внутреннему» нагреву материала.

Микроволновое излучение обеспечивает высокое качество продукции, энерго- и ресурсосбережение, быстроту приготовления, при этом нагрев происходит по всему объему продукта, уменьшаются разрушения содержащихся витаминов, биологически активных веществ и эфирных масел.

Во влажном продукте, при достаточно больших значениях параметров тепло- и массопроводности, конвекционная сушка имеет преимущества в силу существенно более высокого КПД получения энергии (теплоты). По мере уменьшения (в процессе обезвоживания продуктов) параметров тепло- и массопроводности и естественного снижения эффективности конвекционной сушки менее энергоемкой становится инфракрасная и микроволновая сушка. Таким образом, представляется целесообразным изучить и реализовать на практике возможность наиболее экономичного с энергетической точки зрения совмещения двух физических механизмов сушки (конвекционного и инфракрасного или микроволнового) и достижения на этой основе дальнейшего существенного снижения энергоемкости процесса обезвоживания.

Список литературы

1. Явчуновский В.Я. Микроволновая и комбинированная сушка: физические основы, технологии и оборудование. –Саратов: Изд-во Сарат.Ун-та, 1999. -213с.
2. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973.-528с
3. Атаназевич В.И. Сушка пищевых продуктов. –М.; 2000 -198с.
4. Гинзбург А.С. Технология сушки пищевых продуктов. –М.:Пищевая промышленность, 1976. -248с.
5. Филоненко Г.К., Гришин М.А., Гольденберг Я.М. и др. Сушка пищевых растительных материалов. –М: Пищевая промышленность, 1971. -440с.
6. Лыков А.В. Теория сушки. –М: Энергия, 1968. -472с.
7. Антипов С.Т. Тепло- и массообмен при конвективной сушке в движущемся слое продукта //Модернизация существующего и разработка

- новых видов оборудования для пищевой промышленности : Сб. науч. тр./Воронеж. гос.технол.акад. –Воронеж, 2003. –Вып. 13. С. 6-9
8. Гинзбург А.С., Резчиков В.А. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. –М: Пищевая промышленность, 1966. -196с.
 9. Попова С.Б. Совершенствование процесса сушки тыквы в технологии плодоовощных концентратов. Автореф. дисс.канд. техн.наук. –М.,2004. - 25с.
 10. Пенкин А.А. Разработка устройства инфракрасного излучения для термической обработки зерна и локального обогрева. Автореф. дисс.канд. техн.наук. –М.,2005. -20с.
 11. Антипов С.Т. Влияние значений напряженности электромагнитного поля на процесс диэлектрической сушки семян кориандра //Хранение и переработка сельхоз.сырья. -2002.-№9. –С. 50-51
 12. Антипов С.Т., Валуйский В.Я., Меснянкин. Тепло- и массообмен при сушке в аппаратах с вращающимся барабаном. /Воронеж. гос.технол.акад. –Воронеж, 2001. -308с.
 13. ИК - сушка – перспектива развития сушильной отрасли/Клямкин Н.К.// Техн. и оборуд. для села, 1999 –с. 20-21.-Рус.