4. Тутельян, В. А. Нормативная база оценки качества и безопасности / В.А. Тутельян, Д.Б. Никитюк, С.А. Хотимченко // RUSSIAN JOURNAL OF REHABILITATION MEDICINE. – 2017. – №2. – С. 74-120.
5. Красникова Е. В. Проблема продовольственной безопасности на современном этапе [Электронный ресурс] / Е. В. Красникова // Priority directions of modern economics development. – Режим доступа: https://interactiveplus.ru/en/article/18339/discussion_platform (дата обращения: 25.05.2020).
6. Николаева, М. А. Актуальные проблемы научного товароведения // Индустрия питания. – 2017. – №3. – С. 46 – 51.
7. Донченко, Л. В. Безопасность пищевой продукции / Л.В. Донченко, В.Д. Надыкта. – М.: ДеЛи принт, 2013. – 540 с.
8. Рыжков, Е. И. Актуальные вопросы обеспечения качества и безопасности потребительских товаров / Е.И. Рыжков, Е.А. Рудакова // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. – 2016. – №1. – С.10-16.
9. Логвинчук, Т. М., Разработка рецептурных композиций функциональных напитков на основе растворимого цикория // Ползуновский вестник. – 2019. №4. – С.58-62. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2019.04.013>.
10. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции».

Малин Н.И., Кукушкина Т.С.

**Новый подход к учету производительности и оценке энергоэффективности
хмелесушилок**

*Российский государственный аграрный университет-Московская
сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-06-2020-92

idsp: ljjournal-06-2020-92

Аннотация

Показан недостаток метода, используемого для учета производительности хмелесушилок и последующего определения их энергоэффективности по количеству испаряемой влаги, в силу наличия в шишках хмеля влаги различных форм связи. По аналогии с сушкой зерна приведен алгоритм формализации процесса оценки производительности хмелесушилок в плановых тоннах и последующего учета этого показателя для оценки их энергоэффективности, в том числе в условиях использования различных режимов их работы.

Ключевые слова: хмелесушилка; производительность; плановая тонна; энергоэффективность.

Abstract

The disadvantage of the method used to account for the performance of hop dryers and the subsequent determination of their energy efficiency by the amount of evaporated moisture, due to the presence of various forms of bonding in the hop cones, is shown. By analogy with grain drying, an algorithm for formalizing the process of evaluating the performance of hoppers dryers in planned tons and the subsequent consideration of this indicator to assess their energy efficiency, including under the conditions of using various operating modes, is given.

Keywords: hop dryer; performance; planned ton; energy efficiency.

Производительность хмелесушилок традиционно, по аналогии с плодово- и овощесушилками, принято оценивать в кг испаренной влаги [3; 12; 15], хотя для всех этих объектов сушки характерно наличие различных форм связи. В силу этого энергозатраты на удаление влаги из тех же шишек хмеля на начальных этапах сушки несопоставимы с энергозатратами на заключительных этапах сушки.

Отечественная практика, на примере сушки зерна, являющегося приближенным аналогом шишек хмеля, как объекта сушки (в силу таких признаков, как: структура

материала; формы связи влаги; гигроскопичность; особенности анатомического строения; химический состав) показала, что на предприятиях, близких по объему сушки хмеля и работающих практически в одинаковых условиях, и на однотипном оборудовании, существуют большие различия в удельных расходах топлива и электроэнергии на сушку [1; 9]. Это предопределяет необходимость внедрения научно обоснованных норм удельных расходов топлива и электроэнергии на сушку хмеля, как одного из важнейших факторов, стимулирующих рациональное использование энергоресурсов и обеспечивающих технический прогресс.

ГОСТ 28150-89 (СТ СЭВ 6187-88) Хмелесушилки непрерывного действия. Показатели энергопотребления, действие которого распространяется на вновь производимые хмелесушилки непрерывного действия, предназначенные для сушки и кондиционирования хмеля, устанавливает приведенные в табл. 1 (по существу, нормативные) показатели удельного потребления тепловой и электрической энергии в этих установках для процесса сушки и кондиционирования [4].

Следует учитывать, что тепловая энергия в хмелесушилках используется исключительно для целей сушки, поскольку в зону кондиционирования поступает отработанный (и вдобавок, дополнительно увлажненный) агент сушки. То есть в зоне кондиционирования имеют место затраты исключительно электрической энергии на нужды перемещения просушенного хмеля и нагнетания увлажненного воздуха.

Таблица 1

Максимально допустимые показатели энергопотребления на операции сушки и кондиционирования шишек хмеля*

Вид энергии	Удельное потребление энергии, ГДж	
	на испарение 1 т воды	на сушку 1 т хмеля
Тепловая	5,0	18,5
Электрическая	0,4	1,5
Суммарное потребление	5,4	20,0
Примечания* <ul style="list-style-type: none"> • температура сушильного воздуха не должна превышать 65 °С; • исходная влажность хмеля должна составлять (80±2%); • конечная влажность высушенного хмеля должна составлять (6±1)%; • конечная влажность кондиционированного хмеля должна составлять (11±1)% 		

Используемый в мировой практике для оценки затрат теплоты на сушку любых материалов показатель удельного расхода теплоты Σq (включая, помимо потерь в теплогенераторе, затраты на испарение влаги, а также потери на нагрев материала, в окружающую среду через ограждения сушилки и с отработанным агентом сушки) в пересчете на 1 кг испаренной влаги характеризует, насколько фактические затраты теплоты превышают скрытую теплоту парообразования воды r (при испарении с открытой поверхности) при данной температуре материала [11].

Рассмотрение зависимости физических характеристик воды и пара (на линии насыщения) от температуры показало, что применение используемой в практических расчетах зависимости вида $r = (2500 - b\theta) \theta$, где $b = \text{const}$, неправомерно, поскольку по мере роста температуры материала θ растет и величина b [11].

Расчеты, на примере сушки зерна, показали, что при использовании допустимых пределов температуры нагрева зерна удельная теплота парообразования воды (кДж / кг_{вл}),

$$r = 2500 - (2,3 + 0,0014 \theta) \theta, \quad (1)$$

то есть величина $b = 2,3 + 0,0014 \theta$ является функциональной зависимостью текущих значений температуры зерна.

Используя выражение (1) и принимая температуру шишек хмеля на уровне среднего значения $\theta_{\text{ср}}$ (°С) между начальной θ_0 (на входе в зону сушки, на примере трехконвейерной хмелесушилки ПХБ-750к) и конечной (после 3 конвейера) температурой θ_3 шишек хмеля, $\theta_{\text{ср}} = (\theta_0 + \theta_3)/2 = (20 + 60)/2 = 40$ °С, можно определить

фактические затраты теплоты исключительно на испарение 1 т влаги: $r = 10^3 [2500 - (2,3 + 0,0014 \theta) \theta] = 10^3 [2500 - (2,3 + 0,0014 \cdot 40) \cdot 40] = 2\,405\,760 \text{ кДж} \approx 2,4 \text{ ГДж}$.

Таким образом, используя понятие «термический коэффициент полезного действия» η_t , представляющий собой отношение полезно использованной теплоты (то есть пошедшей на испарение влаги) к суммарным затратам теплоты на процесс сушки, можно установить, что для хмелесушилок указанный выше нормативный документ [4] определяет $\eta_t = 2,4/5,0 = 0,48$, что находится в пределах значений термического КПД сушилок для растительных материалов широкого диапазона названий.

Значение Σq , а следовательно, и $q_{\text{исп}}$ (то есть удельная теплота, пошедшая исключительно на испарение влаги) существенно зависят от влажности любого, подвергаемого сушке, коллоидного капиллярно-пористого материала. Чем ближе влажность материала к равновесному значению, тем больше теплоты требуется на ее испарение в связи с наличием различных форм связи с материалом, каждая из которых характеризуется определенным количеством тепловой энергии, которую необходимо затратить на преодоление этой связи и на испарение влаги.

В отечественной практике зерносушения, в связи с необходимостью планирования расхода топлива на определенное число часов работы конкретной зерносушилки, принято использовать показатель «норма расхода условного топлива на сушку одной плановой тонны зерна» [9].

Понятие «плановая тонна» введено для учета объема работы и производительности зерносушилок в условных плановых единицах. В качестве эталона за одну *плановую единицу* принята одна тонна зерна пшеницы продовольственного назначения влажностью 20%, высушенная до влажности 14%. При сушке зерна других культур и других значений влажности вводят специальные коэффициенты, определяемые по соответствующим таблицам инструкции по сушке зерна [6; 9].

Необходимо отметить, что и за рубежом используют понятие, близкое к плановой тонне. В рекламных проспектах зарубежных зерносушилок традиционно указывают производительность при снятии влаги с 19 до 14% (иногда, при снятии влаги с 18 до 14%). Действующие в нашей стране значения влажности «с 20 до 14%» были введены лишь в 1960 г., а до этого официально, при расшифровке понятия «плановая» тонна указывалась влажность в пределах 17...14% [14]. При переходе от таблиц с диапазоном влажности 17...14% к таблицам с диапазоном 20...14% был сделан пересчет с применением метода пропорциональных соотношений, идентичного по методологии применения временному подобию, используемому при моделировании процессов на основе теории подобию, в совокупности с методом начальных условий [2; 8]. При этом, первоначально (1960 г.) были разработаны таблицы [7] в расчете на предельное значение начальной влажности подвергаемого сушке зерна 30,5%, а затем (1982 г.) были разработаны таблицы в расчете на предельное значение начальной влажности подвергаемого сушке зерна 40,0% [6].

Таким образом, понятие «плановая» тонна понятие чисто условное.

Если проанализировать содержание табл. 1, нетрудно заметить, что она ориентирована на определенные значения начальной и конечной влажности шишек хмеля ($80 \pm 2\% \downarrow 6\%$). А ведь в практике сушки хмеля возможны варианты с другими значениями начальной и конечной влажности, например: $75\% \downarrow 6\%$; $75\% \downarrow 8\%$; $82\% \downarrow 8\%$ и любые другие, в том числе $66\% \downarrow 6\%$ (когда после использования приема активного вентилирования свежесобранных шишек хмеля в течение 12...14 ч влажность шишек, поступающих на сушку может понизиться с 80% до 66%). Поэтому, в силу несопоставимости значений влажности (и, как следствие, форм связи влаги) могут возникнуть сложности с оценкой фактических удельных затрат тепловой энергии на сушку шишек хмеля.

Следовательно, напрашивается вопрос о целесообразности и даже необходимости введения, по аналогии с сушкой зерна, понятия и разработки методологии определения массы просушенных шишек хмеля в плановых единицах. И

уже на этой основе оценивать энергоэффективность хмелесушилок по удельным затратам тепловой энергии (или условного топлива) на сушку одной плановой тонны шишек хмеля.

Для разработки метода оценки объема просушенных шишек хмеля в плановые тонны используем метод «оптимальных» конечных параметров, в основу которого положено соотношение [11]

$$K_B = (w_0^c - w_2^c) / (w_0^c - w_{2\text{опт}}^c), \quad (2)$$

где K_B – коэффициент перевода массы просушенного зерна в плановые единицы в зависимости от начальной и конечной влажности зерна; безразмерная величина, носящая второе название – коэффициент эффективности влагосъема;

w_0^c , w_2^c , $w_{2\text{опт}}^c$ – соответственно, начальная, конечная (на данном этапе сушки) и конечная «оптимальная» влажность, в расчете на массу сухого вещества зерна, %.

Для того, чтобы воспользоваться выражением (2), нами, на основе приведенной в [9] таблице со значениями K_B для зерна с начальными значениями влажности в диапазоне 13,5...40,0% и конечными значениями в диапазоне 12,0...35,0%, была построена приведенная на рис. 1 графическая полиномиальная зависимость коэффициента эффективности влагосъема K_B для зерна в диапазоне начальной влажности $w_0 = 16,0...20,0\%$, при конечной влажности $w_2 = 14,0\%$.

Рисунок 1 – Функциональная зависимость коэффициента эффективности влагосъема K_B от начальной влажности зерна

Далее, исходя из условий, что и зерно, и шишки хмеля являются коллоидными капиллярно-пористыми телами [1; 10; 16], а также то, что шишки хмеля содержат примерно в 2 раза больше влаги, мы использовали метод, аналогичный использованному (инженер Кирзнер О.Б., 1957...1958 гг.) при пересчете исходных таблиц с влажностью в диапазоне 17...14% к таблице с влажностью в диапазоне 20...14%. При этом задались диапазоном влажности в пределах 66...6%. Именно при этих соотношениях влажности и в зерне и шишках хмеля, согласно данным [1; 10; 13], наблюдается преобладающее содержание физико-химически связанной влаги. Это означает, что при начальной влажности шишек $w_0 = 66,0\%$ и конечной влажности шишек $w_2 = 6,0\%$, для достижения значения $K_B = 1$, конечная «оптимальная» влажность шишек хмеля должна иметь значение $w_{2\text{опт}} = 6,0\%$.

В результате, была получена нанесенная на рис. 2 полиномиальная графическая зависимость коэффициента эффективности влагосъема K_B для шишек хмеля в диапазоне начальной влажности $w_0 = 26,0...80,0\%$, при конечной влажности $w_2 = 6,0\%$.

Рисунок 2 – Функциональная зависимость коэффициента K_v от начальной влажности шишек хмеля

Для упрощения процедуры дальнейших расчетов с использованием выражения (2), были использованы значения влажности в расчете на общую массу шишек хмеля, то есть так называемой относительной влажности.

На следующем этапе, используя преобразованное относительно $w_{2\text{опт}}$ выражение (2)

$$w_{2\text{опт}} = w_0 - (w_0 - w_2) / K_v, \quad (3)$$

были рассчитаны, нанесенные в виде полиномиальной зависимости на рис. 3, значения $w_{2\text{опт}}$ в диапазоне значений начальной влажности $w_0 = 26,0 \dots 80,0\%$ и получено уравнение, справедливое для расчета $w_{2\text{опт}}$ в любом диапазоне исходной влажности шишек хмеля:

$$w_{2\text{опт}} = -0,0000756(w - 25)^3 + 0,0087(w - 25)^2 + 0,1925(w - 25) - 11,302. \quad (4)$$

Рисунок 3 – Функциональная зависимость конечной «оптимальной» влажности $w_{2\text{опт}}$ (%) от начальной влажности шишек хмеля (%)

Использование выражений (2) и (4) позволяет провести необходимые расчеты с целью установления производительности хмелесушилки в план. т / ч и последующей оценки ее энергоэффективности (кг_{у.т} / план. т), что покажем на нижеприведенном примере.

Пример: Производительность 3 ярусной хмелесушилки по испаренной влаге (в привязке к табл. 1) $W = 1000$ кг / ч; влажность шишек хмеля: до сушки – $w_0 = 80\%$, после сушки (после 3 яруса) – $w_3 = 6\%$.

Решение: Производительность хмелесушилки (кг / ч) при начальной влажности шишек хмеля

$$G_0 = W (100 - w_3) / (w_0 - w_3) = 1000 (100 - 6) / (80 - 6) = 1270,27 \text{ кг / ч.}$$

Конечная оптимальная влажность при начальной влажности шишек хмеля 80% составляет, согласно (4):

$$\begin{aligned} W_{\text{опт}} &= -0,0000756(w - 25)^3 + 0,0087(w - 25)^2 + 0,1925(w - 25) - 11,302 = \\ &= -0,0000756(80 - 25)^3 + 0,0087(80 - 25)^2 + 0,1925(80 - 25) - 11,302 = 13,03\%. \end{aligned}$$

Коэффициент эффективности влагосъема при снижении влажности с 80% до 6% составляет, согласно (2), в условиях использования значений относительной влажности:

$$K_b = (w_0 - w_3) / (w_0 - w_{\text{опт}}) = (80 - 6) / (80 - 13,03) = 1,105.$$

Производительность хмелесушилки

$$G = 10^{-3} \cdot G_0 K_b = 10^{-3} \cdot 1270,27 \cdot 1,105 = 1,404 \text{ план. т / ч.}$$

Удельный расход условного топлива на сушку шишек b_y , с учетом нормативного расхода теплоты B_n (ГДж) на испарение 1 т влаги (табл. 1) и низшей теплоты сгорания условного топлива Q_n^p (кДж / кг), составляет:

$$b_y = (10^6 \cdot B_n / Q_n^p) / G = (10^6 \cdot 5 / 29330) / 1,404 = 121,42 \text{ кг}_{\text{у.т}} / \text{план. т.}$$

Основные результаты и выводы

Показано несовершенство существующей методики учета производительности и оценки энергоэффективности хмелесушилок.

По аналогии с сушкой зерна, предложено, в условиях проведения исследований, для учета производительности использовать понятие «плановая тонна», под которой подразумевается 1 т шишек хмеля, просушенных от 66% до 6% влажности.

Итоговые результаты показали возможность использования предложенной методики в исследовательских целях, в том числе при оценке сравнительной энергоэффективности различных типов хмелесушилок и различных режимов их работы.

1. Александров, Н.А. Агробιοлогические основы возделывания и производства хмеля и хмелепродуктов в Российской Федерации / Н.А. Александров, А.Р. Рупов; под ред. Н.А. Александрова. – М.: Новое время, 2018. – 648 с.
2. Аношин, И.М. Теоретические основы массообменных процессов пищевых производств: учеб. пособие / И.М. Аношин. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 344 с.
3. Бурич, О. Сушка плодов и овощей: пер. с венг. (Будапешт, 1974) / О. Бурич, Ф. Берки; пер. О.А. Воронова; под ред. А.С. Гинзбурга. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 280 с.
4. ГОСТ 28150-89 (СТ СЭВ 6187-88) Хмелесушилки непрерывного действия. Показатели энергопотребления.
5. Гришин, М.А. Установки для сушки пищевых продуктов: справочник / М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов. – М.: Агропромиздат, 1989. – 215 с.
6. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, маслосемян и эксплуатации зерносушилок № 9-3-82. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1982. – 61 с.
7. Инструкция по сушке продовольственного, фуражного зерна и эксплуатации зерносушилок. – М.: Хлебоиздат, 1960. – 60 с.
8. Кавецкий, Г.Д. Технологические процессы и производства (пищевая промышленность): учебник / Г.Д. Кавецкий, А.В. Воробьева. – М.: КолосС, 2006. – 368 с.
9. Малин, Н.И. Справочник по сушке зерна / Н.И. Малин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 159 с.
10. Малин, Н.И. Технология хранения зерна: учебник / Н.И. Малин. – М.: КолосС, 2005. – 280 с.

11. Малин, Н.И. Энергосберегающая сушка зерна: учеб. пособие / Н.И. Малин. – М.: КолосС, 2004. – 240 с.
12. Мальтри, В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения: сокр. пер. с нем. / В. Мальтри, Э. Петке, Б. Шнайдер; пер. В.М. Комиссаров, Ю.Л. Фрегер; под ред. В.Г. Евдокимова. – М.: Машиностроение, 1979. – 525 с.
13. Рейтман И.Г. Дыхание и теплофизические свойства массы свежесорванных шишек хмеля / Сборник научных трудов // Научно-исследовательский и технологический институт хмелеводства. – Киев, 1981. Вып. 3: Хмелеводство. – С. 55-59.
14. Скороваров, М.А. Режимы сушки зерна / М.А. Скороваров; под ред. Б.В. Даммана. – М.: Хлебоиздат, 1959. – 68 с.
15. Трисвятский, Л.А. Хранение и технология сельскохозяйственных продуктов: учебник / Л.А. Трисвятский, Б.В. Лесик, В.Н. Курдина, под ред. Л.А. Трисвятского. 4 изд. перераб. и доп. – М.: ВО Агропромиздат, 1991. – 415 с.
16. Филоненко, Г.К. Сушка пищевых растительных материалов: учеб. пособие / Г.К. Филоненко, М.А. Гришин, Я.М. Гольденберг и др. – М.: Изд-во «Пищевая промышленность», 1971. – 440 с.

Малин Н.И.

Использование метода «оптимальных» конечных параметров в моделировании кинетики двухступенчатой сушки зерна

*Российский государственный аграрный университет-Московская
сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-06-2020-93

idsp: ljjournal-06-2020-93

Аннотация

Дано описание сущности разработанного автором метода «оптимальных» конечных параметров и возможностей использования полученных на его основе обобщенных функциональных зависимостей эффективности обезвоживания и нагрева зерна для оценки сравнительной энергоэффективности различных вариантов и режимов сушки зерна. Отмечено, что описание кинетики двухступенчатой сушки зерна, в условиях использования агента сушки с изменяющимися по ходу процесса параметрами, вызывает, в отличие от описания одноступенчатой сушки, определенные трудности. Это связано с тем, что во вторую ступень сушки поступает зерно с частично обезвоженной поверхностью и повышенной, в сравнении с начальным значением, температурой. Доказана возможность и достаточная надежность использования метода «оптимальных» конечных параметров для моделирования процесса двухступенчатой сушки зерна. Для сравнительной оценки использованы результаты расчета одноступенчатой сушки зерна с усредненными по ступеням сушки параметрами агента сушки.

Ключевые слова: сушка зерна; эффективность обезвоживания; эффективность нагрева; кривая сушки; термограмма; моделирование.

Abstract

The essence of the method of «optimal» final parameters developed by the author and the possibilities of using the generalized functional dependences of the efficiency of dehydration and heating of grain obtained on its basis to assess the comparative energy efficiency of various options and modes of drying the grain are described. It is noted that the description of the kinetics of two-stage drying of grain, under conditions of using a drying agent with parameters varying during the process, causes, in contrast to the description of one-stage drying, certain difficulties. This is due to the fact that grain with a partially dehydrated surface and increased temperature in comparison with the initial value enters the second stage of drying. The possibility and sufficient reliability of using the method of «optimal» final parameters for modeling the process of two-stage drying of grain is proved.