

УДК 664.8.047

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ

В. М. АРАПОВ, М. В. АРАПОВ, М. В. МАМОНТОВ

*Государственное образовательное учреждение
«Воронежская государственная технологическая
академия», Россия*

Состояние вопроса и постановка задачи исследования

Сушка является одним из энергоемких технологических процессов, поэтому оптимизация теплового режима является важной технической задачей. Для пищевых и других термолабильных продуктов при решении указанной задачи оптимизации необходимо предварительно установить область допустимых температурных режимов сушки.

При определении области допустимых температурных режимов необходимо учитывать, что в процессе сушки материал должен приобрести требуемые стандартом соответствующие характеристики (структурные, органолептические, физико-химические) и в максимально возможной степени сохранить ряд нативных свойств. Поэтому сушка рассматривается не только как тепломассообменный, но и как технологический процесс, в котором необходимо и формировать, и управлять соответствующими технологическими свойствами. Для конкретного продукта те или иные свойства являются наиболее важными и определяют его качественные показатели. Поэтому необходимо, чтобы в процессе сушки были сохранены, а по возможности и улучшены, именно эти свойства, в то время как другие будут неизбежно изменяться [1], [2]. Однако процесс сушки может способствовать осуществлению необратимых изменений в продукте, которые в большей мере связаны с тепловым воздействием на него. С одной стороны, повышение температуры сушильного агента является фактором интенсификации процесса, с другой – чрезмерное тепловое воздействие приводит к браку готового продукта.

Анализ научно-технической литературы [1]–[11] по этому вопросу показывает, что степень теплового воздействия на термолабильные компоненты (количество компонента, потерявшего под воздействием теплоты свои исходные свойства) является функцией, прежде всего, температуры и продолжительности теплового воздействия. При этом многие видные ученые в области сушки полагают, что критерием термостойкости продуктов может быть максимально допустимая температура нагрева их в процессе сушки [1], [3], [8], [9].

Максимально допустимая температура нагрева материала, как правило, определяется опытным путем в процессе экспериментальных исследований или производственных испытаний конкретного продукта в конкретной сушильной установке. Однако следует особо подчеркнуть, что различные исследователи приводят противоречивые данные о величине максимально допустимой температуры для одного и того же материала [7]. На основании изложенного разработка условий и критериев, которые позволяют определить область допустимых тепловых режимов сушки, представляет актуальную задачу исследования.

Определение области допустимых тепловых режимов должно основываться на совместном рассмотрении процесса удаления влаги из вещества с физико-хими-

ческими, биохимическими, реологическими и другими процессами, происходящими в продукте под воздействием теплоты. Необходимо рассмотреть кинетику всех этих процессов, установить законы, которым она подчиняется и на основании этого сформулировать условия допустимости температурных режимов сушки.

Процессы, протекающие при сушке термолабильных продуктов. Пищевые продукты являются ярким представителем термолабильных продуктов. Их сушка сопровождается наибольшим количеством сопутствующих физико-химических и других процессов. Среди них – инверсия сахарозы, реологические процессы, связанные с усадкой продукта, клейстеризация крахмала, карамелизация сахаров, денатурация белков, термоинактивация микроорганизмов и ферментов. В настоящее время накопился обширный экспериментальный материал по кинетике протекания этих процессов под воздействием теплоты [1], [3], [5], [7]–[9], [11], анализ которого позволил нам сделать следующий вывод. Кинетические закономерности, связанные с физико-химическими, биохимическими, реологическими и другими превращениями в термолабильных компонентах, могут быть описаны законами кинетики химических реакций. В частности, скорость протекания этих процессов может быть описана уравнениями Аррениуса или Эйринга.

Поэтому сушку будем рассматривать в широком плане как гетерогенную реакцию, обусловленную целым комплексом химических, физико-химических, биохимических и реологических процессов, кинетика которых наряду с кинетикой переноса энергии и вещества определяет механизм, скорость протекания процессов сушки и качество продукта.

Формирование основной научной гипотезы

Тепловой режим сушки будем считать допустимым, если он обеспечивает сушку продукта до требуемого конечного влагосодержания при сохранении качественных показателей на продукт, предусмотренных стандартом. Количественный критерий допустимости теплового режима сушки должен быть получен на основе совместного рассмотрения кинетики сушки с кинетикой превращений в термолабильных компонентах, которые могут быть описаны законами кинетики химических реакций.

Разработка математической модели и критериев области допустимых тепловых режимов сушки. При получении математической модели допустимых тепловых режимов сушки будем исходить из следующих положений.

При тепловом воздействии на продукт в процессе сушки в нем происходит распад ценных компонентов или накопление вредных компонентов. В общем случае будем называть потерю компонентом своих начальных (нативных) свойств под воздействием теплоты его переходом в активированный комплекс. Максимальное количество компонента, перешедшего в активированный комплекс, не должно превышать значения, установленного соответствующим стандартом на продукт.

Скорость перехода компонента в активированный комплекс определяется законами кинетики химических реакций.

Средняя по объему температура материала, которую он приобретает в процессе сушки, является функцией температуры сушильного газа; в первом приближении примем ее среднеинтегральное значение в интервале всего времени сушки пропорциональной температуре сушильного газа.

Рассмотрим продукт, содержащий несколько термолабильных компонентов. Пусть, согласно действующему стандарту на продукт, максимальное количество каждого из этих компонентов, перешедших в активированный комплекс под воздействием теплоты, не превышает соответственно M_{\max}^i . Скорость перехода в активиро-

ванный комплекс i -го компонента определим законом кинетики химических реакций в виде:

$$\frac{d\alpha^i}{d\tau} = f(\alpha^i) \cdot K_i, \quad (1)$$

где $f(\alpha^i)$ – функция степени превращения i -го компонента; K_i – константа скорости реакции i -го компонента, с^{-1} ; $\alpha^i = M^i/M_{\text{н}}^i$ – степень превращения i -го компонента; M^i , $M_{\text{н}}^i$ – масса (концентрация) в момент времени τ и начальная масса i -го компонента, кг/кг.

Процесс сушки пищевого продукта при температуре сушильного агента T_c можно вести до тех пор, пока количество какого-либо компонента, перешедшего из нативного состояния в активированный комплекс, не достигнет максимума, допускаемого действующим стандартом. Максимально допустимое время сушки продукта при температуре сушильного агента T_c определим из условия:

$$\int_0^{\alpha_{\text{max}}^i} \frac{d\alpha^i}{f(\alpha^i)} = \int_0^{\tau_{\text{max}}} K_i \cdot d\tau, \quad (2)$$

где τ_{max} – максимально допустимое время сушки продукта при температуре сушильного агента T_c , с; α_{max}^i – максимально допустимая стандартом степень превращения i -го компонента.

С другой стороны, указанная продолжительность процесса должна обеспечить сушку пищевого продукта до требуемого конечного влагосодержания. Продолжительность сушки τ_c , исходя из этого условия, определим на основании кинетики процесса:

$$\tau_c = \frac{U_{\text{н}} - U_{\text{кр}}}{N_1} + \int_{U_{\text{к}}}^{U_{\text{кр}}} \frac{dU}{N_2(U)}, \quad (3)$$

где $U_{\text{н}}$, $U_{\text{кр}}$, U – начальное, критическое и текущее влагосодержание; N_1 , N_2 – скорость первого и второго периода сушки.

Тогда условие допустимых температурных режимов запишем в виде:

$$\tau_c \leq \tau_{\text{max}}. \quad (4)$$

Уравнения (2), (3) и (4) представляют в общем виде математическую модель допустимых температурных режимов сушки.

Из приведенной математической модели видно, что термолабильность продукта определяется компонентом, для которого допустимое время обработки при температуре сушильного агента T_c является наименьшим. Будем называть такой компонент определяющим температурный режим сушки.

Рассмотрим случай, когда константа скорости определяющего температурный режим сушки термолабильного компонента рассчитывается по уравнению Эйринга. Уравнение (2) запишем в виде:

$$\int_0^{\alpha_{\text{max}}} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \int_0^{\tau_{\text{max}}} \frac{k}{h} \cdot T(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT(\tau)}\right) \cdot d\tau, \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана, Дж/К; R – универсальная газовая постоянная, ΔF – увеличение свободной энергии, Дж/моль; h – постоянная Планка, Дж · с.

Функцию степени превращения термолабильного компонента представим уравнением:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n, \quad (6)$$

где n – порядок реакции перехода термолабильного компонента в активированный комплекс.

Вычислим интеграл в левой части уравнения (5) для реакции первого порядка:

$$\int_0^{\alpha_{\max}} \frac{d\alpha}{(1 - \alpha)} = -\ln(1 - \alpha_{\max}). \quad (7)$$

В случае, если $n \neq 1$, получим:

$$\int_0^{\alpha_{\max}} \frac{d\alpha}{(1 - \alpha)^n} = \frac{1}{n - 1} \cdot [(1 - \alpha_{\max})^{1-n} - 1]. \quad (8)$$

Поскольку температура материала $T(\tau)$ в процессе сушки пропорциональна температуре сушильного газа T_c , то для интеграла в правой части уравнения (5) можно записать равенство:

$$\int_0^{\tau_{\max}} \frac{k}{h} \cdot T(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT(\tau)}\right) \cdot d\tau = Z \cdot \tau_{\max} \cdot T_c \cdot \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT_c}\right), \quad (9)$$

где Z – коэффициент, $1/(с \cdot К)$.

Анализ полученных уравнений (5), (7), (8) и (9) позволяет сформулировать гипотезу области допустимых тепловых режимов сушки термолабильных материалов в виде функциональной зависимости:

$$\ln(T_c \cdot \tau_{\max}) = a + b \frac{1}{T_c}, \quad (10)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты для данного материала.

Следовательно, вместо распространенных в научной и технической литературе терминов «максимально допустимая температура сушильного агента или материала» необходимо, как это видно из уравнения (10), ввести понятие теплового импульса сушильного агента, под которым следует понимать произведение абсолютной температуры сушильного агента на время обработки этим сушильным агентом. Максимальное значение теплового импульса сушильного агента является линейной функцией обратного значения абсолютной температуры сушильного агента и может рассматриваться в качестве критерия теплового воздействия на термолабильный продукт в процессе сушки. Назовем уравнение (10) уравнением температурных режимов, поскольку оно устанавливает зависимость максимальной продолжительности обработки термолабильного продукта от абсолютной температуры сушильного агента.

Рассмотрим математическую модель допустимых тепловых режимов сушки продуктов, если константа скорости физико-химических превращений в термолабильном компоненте определяется законом Аррениуса. Уравнение (2) запишем в виде:

$$\int_0^{\alpha_{\max}} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \int_0^{\tau_{\max}} A \cdot \exp\left[-\frac{E}{RT(\tau)}\right] \cdot d\tau, \quad (11)$$

где E – энергия активации при образовании активированного комплекса, Дж/моль.

С учетом вышеизложенного вычислим интеграл в правой части уравнения (11):

$$\int_0^{\tau_{\max}} A \cdot \exp\left[-\frac{E}{RT(\tau)}\right] \cdot d\tau = A' \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_c}\right) \cdot \tau_{\max}, \quad (12)$$

где A' – коэффициент, c^{-1} .

В этом случае гипотезу области допустимых температурных режимов сушки сформулируем в виде следующей функциональной зависимости:

$$\ln \tau_{\max} = c + d \frac{1}{T_c}, \quad (13)$$

где c , d – эмпирические коэффициенты для данного материала; τ_{\max} – максимально допустимое время обработки материала сушильным агентом с абсолютной температурой T_c .

При этом за τ_{\max} принимается время обработки продукта сушильным агентом при температуре T_c , в течение которого его качественные показатели остаются в пределах соответствующего стандарта.

Таким образом, в качестве критериев теплового воздействия на термолабильный продукт следует принять максимальный тепловой импульс сушильного агента или максимально допустимое время обработки пищевого продукта сушильным агентом при температуре T_c .

Экспериментальная проверка математической модели допустимых температурных режимов сушки. Для экспериментальной проверки сформулированной гипотезы определения допустимых тепловых режимов сушки термолабильных материалов нами использованы результаты исследования процесса сушки зерна кукурузы [9], [10].

Снижение качества кукурузы в процессе сушки автор [9] определял по изменению содержания лизина в высушенном продукте. За 100 % принималось содержание лизина в образце-свидетеле, высушенном при 20 °С.

В качестве критерия для определения τ_{\max} принято уменьшение лизина на 10 % в высушенном продукте по отношению к стандартному образцу, высушенному при 20 °С.

Как видно из рис. 1 и 2, результаты исследования теплового воздействия на зерно кукурузы в процессе сушки хорошо согласуются со сформулированной нами гипотезой. На этих же графиках нанесены результаты исследования сушки семян кукурузы, выполненные профессором В. А. Резчиковым с сотрудниками во ВНИИЗ [10]. В [10] режим сушки считается допустимым, если исходная, равная 64 %, всхожесть семян после сушки составляла не менее 55 %.

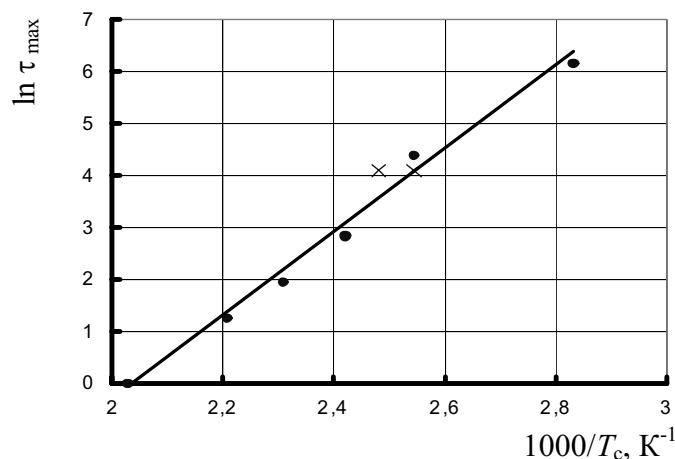


Рис. 1. Зависимость максимального времени сушки кукурузы от абсолютной температуры сушильного агента при 10 % потерях лизина в исходном продукте: × – данные В. А. Резчикова, М. Ю. Уразова при снижении исходной влажности с 64 до 55 % после сушки

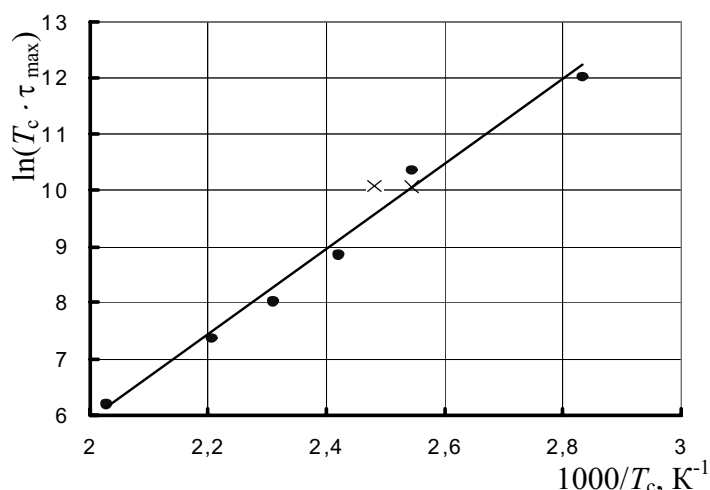


Рис. 2. Зависимость максимального теплового импульса сушильного агента от его абсолютной температуры при 10 % потерях лизина в исходном продукте: × – данные В. А. Резчикова, М. Ю. Уразова (снижение исходной влажности с 64 до 55 % после сушки)

Выводы

Таким образом, следует признать:

1. Величина максимальной температуры сушильного объекта является недостаточной характеристикой для оценки теплового воздействия на продукт и не может применяться в качестве критерия допустимости теплового режима.
2. Сушка материалов сопровождается физико-химическими и другими изменениями в термолабильных компонентах, кинетика которых может быть описана уравнениями Аррениуса или Эйринга.
3. Область допустимых тепловых режимов сушки определяется из совместного рассмотрения кинетики сушки с кинетикой процессов, протекающих в термолабильных компонентах.
4. Критериями области допустимых тепловых режимов является максимальный тепловой импульс сушильного агента или максимально допустимое время обработки

продукта сушильным агентом, которые являются линейными функциями от обратного значения абсолютной температуры сушильного агента.

Литература

1. Гинзбург, А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А. С. Гинзбург. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 336 с.
2. Гинзбург, А. С. Технология сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – Москва : Пищевая пром-сть, 1976. – 248 с.
3. Буйнов, А. А. Научные основы процессов сушки жидких пищевых продуктов во вспененном состоянии: автореф. ... дис. д-ра техн. наук : 05.18.12 / А. А. Буйнов. – Москва : МГУПББ, 1998. – 50 с.
4. Арапов, В. М. Определение максимально допустимой температуры сушильного агента / В. М. Арапов // Пищевые технологии и оборудование для пищевой промышленности : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 17–21 сент. 1997 г. – Воронеж : Воронеж. гос. технол. акад., 1997. – С. 251–252.
5. Arapov, V. M. Estimation of possible tempritures of thermolabile colloide system drying / V. M. Arapov, K. K. Polyanskii, E. E. Kurchaeva // Lipid and Surfactant Dispersed Systems. Moscow, 26 to 28 September, 1999. – P. 101–102.
6. Арапов, В. М. Физико-химическое обоснование температурных режимов сушки термолабильных материалов / В. М. Арапов, И. Т. Кретов, К. К. Полянский // Секция № 2 «Состояние и развитие производства химических продуктов» : материалы докл. XVI Менделеевского съезда по общ. и приклад. химии, Санкт-Петербург, 25–29 мая 1998 г. – Москва, 1998. – С. 9–10.
7. Арапов, В. М. Анализ развития технологии и техники сушки казеина / В. М. Арапов, К. К. Полянский // Молоч. пром-ть. – 1996. – № 4. – С. 14–16.
8. Тутова, Э. Г. Сушка продуктов микробиологического производства / Э. Г. Тутова, П. С. Куц. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 303 с.
9. Мюльбауер, В. Исследование процесса сушки зерна кукурузы в сушилке с параллельными потоками / В. Мюльбауер ; пер. с франц. Н. Н. Угаровой. – Москва : ВЦПНТЛД, 1980. – 133 с.
10. Уразов, М. Ю. Повышение эффективности конвективной сушки зерна кукурузы в плотном слое : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.18.12 / М. Ю. Уразов. – Москва : МГУПП, 1998. – 23 с.
11. Жоли, М. Физическая химия денатурации белков / М. Жоли. – Москва : Мир, 1968. – 364 с.

Получено 04.01.2006 г.