

Владимир Александрович Ермолаев

Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия, профессор кафедры агробиотехнологий, доктор технических наук, профессор, Россия, Кемерово

E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВАКУУМНОЙ СУШКИ СЫРОВ**

Цель исследования – разработать математическую модель для расчета продолжительности процесса вакуумной сушки сыров в зависимости от температуры сушки, плотности теплового потока, величины остаточного давления и площади высушиваемого сыра. Температуру сушки твердых сычужных сыров (с массовой долей влаги 40–42 %) изменяли в пределах от 50 до 80 °С с шагом в 10 °С, тепловая нагрузка в различных экспериментах была равна: 9,2; 8,28; 7,36; 6,44; 5,52; 4,6; 3,68; 2,76; 1,84; 0,92 кВт/м². При подводе теплоты к высушиваемому продукту наибольшей перегрев имеет поверхностный слой материала, в связи с чем процесс сушки контролировался по температуре поверхностного слоя сыра. Установлена рациональная температура вакуумной сушки твердых сычужных сыров – 60 °С, рациональная величина тепловой нагрузки – 5,5 кВт/м². Приведена графическая схема вакуумной сушки сыра при инфракрасном способе подвода. Приведены графики изменения плотности теплового потока, температуры и относительной массы сыра в процессе вакуумной сушки сыров. Математическое описание реального процесса вакуумной сушки пищевых продуктов – достаточно сложная и трудоемкая задача. Поэтому для описания данного процесса ввели некоторые основные допущения. Произведены математически выкладки по описанию процесса вакуумной сушки сыров. Разработана модель для расчета продолжительности процесса вакуумной сушки сыров в зависимости от температуры сушки, плотности теплового потока, величины остаточного давления и площади высушиваемого сыра.

Ключевые слова: вакуумная сушка, математическая модель, сыр, остаточное давление, температура, влага.

Vladimir A. Ermolaev

Kuzbass State Agricultural Academy, professor of the chair of agrobiotechnologies, doctor of technical sciences, professor, Russia, Kemerovo

E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

**THE DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL
OF LOW-TEMPERATURE VACUUM DRYING OF CHEESES**

The research objective was to develop mathematical model for the calculation of the duration of the process of vacuum drying of cheeses depending on the temperature of drying, the density of thermal stream, the size of residual pressure and the area of the dried-up cheese. The temperature for drying hard rennet cheeses (with a mass fraction of moisture of 40–42 %) was changed ranging from 50 to 80 °C with a step to 10 °C, thermal loading in various experiments was equal: 9.2; 8.28; 7.36; 6.44; 5.52; 4.6; 3.68; 2.76; 1.84; 0.92 kW/m². When heat was applied to the dried product, the surface layer of the material was most overheated, so drying process was controlled by the temperature of the surface layer of cheese. Rational tem-

perature of vacuum drying of hard rennet cheeses was 60 °C, and rational value of the heat load was 5.5 kW/m². The graphs of changes in the heat flux density, temperature, and relative mass of cheese during vacuum drying of cheeses were given. The schedules of the change of heat flux of density, the temperature and relative mass of cheese in the course of vacuum drying of cheeses were provided. Mathematical description of real process of vacuum drying of foodstuff was rather complex and labor-consuming challenge. Therefore for the description of this process some main assumptions were used. The calculations according to the description of the process of vacuum drying of cheeses were made mathematically. The model has been developed for calculating the duration of the cheese vacuum drying process depending on the drying temperature, heat flux density, residual pressure and the area of dried cheese.

Keywords: vacuum drying, mathematical model, cheese, residual pressure, temperature, moisture.

Введение. Сушку термолабильных материалов, к которым относятся и сыры, невозможно сушить конвективным или кондуктивным методом при температурах выше 60 °C теплоносителя. Для термолабильных материалов необходимо использовать вакуумную сушку, которая используется в различных отраслях промышленности, в том числе для пищевых продуктов. При сушке в вакуумной камере основное тепло передается материалу радиацией или кондукцией от греющих поверхностей [1–3]. На практике вакуумную сушку пищевых продуктов проводят в герметичной теплоизолированной камере, снабженной нагревательными элементами, как правило, все вакуумные сушильные установки в своем составе содержат холодильные машины для интенсификации процесса сушки [4–6].

Принято считать, что если вакуумная сушка протекает при остаточном давлении выше 1–2 кПа, тепло и влагоперенос обезвоживаемого продукта подчиняется закономерностям переноса тепла и влаги при конвективной сушке. В процессе вакуумной сушки испарившаяся влага, а также влага, проникающая из-за негерметичности вакуумной системы, отсасывается вакуумным насосом и утилизируется в окружающую среду. Для интенсификации процесса вакуумной сушки за счет ускорения удаления влаги из вакуумной камеры используют конденсаторы холодильных машин. Испарившаяся влага из вакуумной камеры за счет разницы парциальных давлений перемещается к конденсатору и конденсируется на его поверхности [7–9].

При вакуумной сушке пищевых продуктов используют различные способы подвода теплоты:

– ступенчатый способ подвода теплоты при неизменяющемся остаточном давлении среды

(при этом процесс сушки протекает при постепенно убывающей тепловой нагрузке и постоянной температуре в камере);

– импульсный (или «осциллирующий») способ подвода теплоты при неизменяющемся остаточном давлении среды (при этом сушильный процесс складывается из чередующихся стадий прогрева и отлежки при постоянной температуре в камере);

– многоступенчатые (многоуровневые) режимы подвода теплоты при постоянной температуре в камере и чередующихся величинах остаточного давления и тепловой нагрузки.

Из рисунка 1 видно, что процесс сушки начинается по истечении 10–15 мин, за это время в вакуумной камере достигается требуемое остаточное давление, а температура поверхности конденсатора достигает значения минус 25 °C.

Это необходимо для уменьшения фазового сопротивления и ускорения теплообмена и массообмена между высушиваемым материалом и теплоносителем. Продолжительность выхода установки на режим по остаточному давлению незначительна относительно общей продолжительности процесса вакуумной сушки.

Подвод теплоты осуществляется по достижении требуемого остаточного давления в вакуумной камере. Процесс вакуумной сушки сыров делится на два периода:

– первый период – период постоянной скорости сушки, когда за одинаковый интервал времени удаляется одинаковое количество влаги;

– второй период – период падающей скорости сушки, когда с каждым промежутком времени за одинаковый период удаляется меньшее количество влаги.

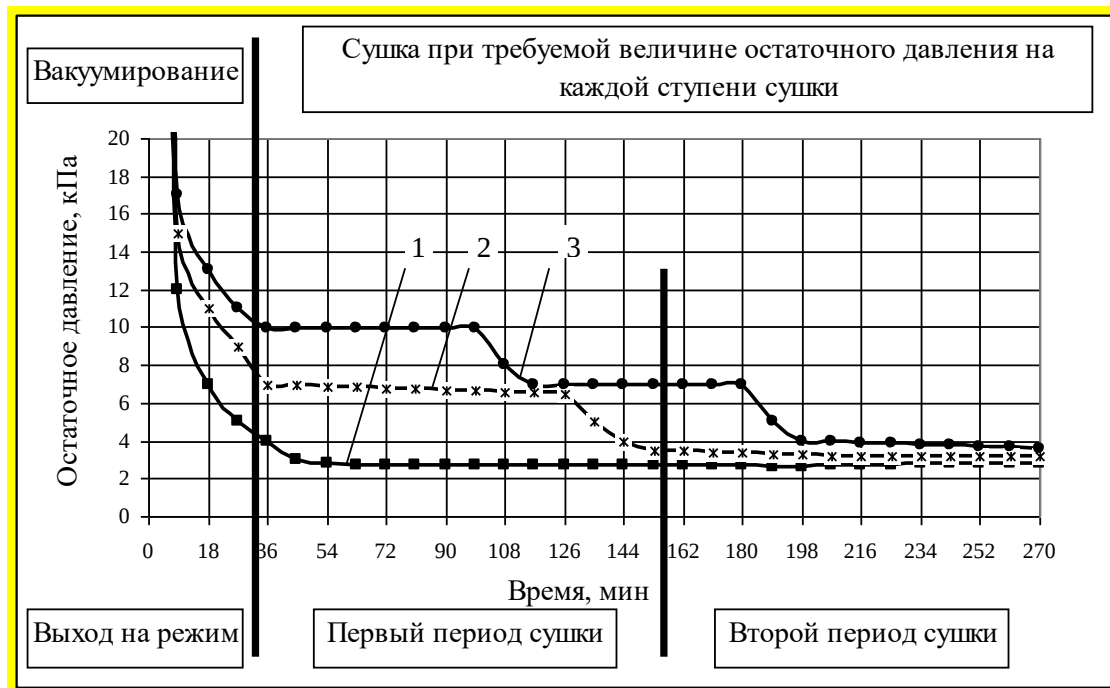


Рис. 1. Общий вид изменения остаточного давления при вакуумной сушке сыра, сушка: 1 – одноступенчатая; 2 – двухступенчатая; 3 – трехступенчатая

В процессе вакуумной сушки тепло и влагоперенос подчиняются общим закономерностям термодинамики необратимых процессов. До выхода установки на режим по остаточному давлению теплота не подводится, температура поверхностных слоев продукта понижается за счет самоиспарения. При этом градиент температуры и градиент влагосодержания совпадают друг с другом по направлению, что ускоряет процесс вакуумной сушки.

Первый период начинается в момент включения нагревателей и характеризуется постоянной скоростью сушки. За счет того, что процесс происходит при пониженном давлении, прогрев вызывает интенсивное вскипание влаги по всему объему сыра. Разность температур поверхностных и внутренних слоев является потенциалом переноса теплоты в толщу продукта за счет теплопроводности.

Динамика процесса вакуумной сушки основывается на общих положениях и законах равновесия жидкости и пара. При понижении парциального давления над поверхностью высушиваемого продукта направляет динамическое равновесие на интенсификации испарения влаги, что является драйвером процесса вакуумной сушки [10–12].

Инфракрасный способ подвода теплоты ускоряет процесс сушки за счет одинаковой направленности градиента температуры и влагосодержания [13–15].

Кинетика удаления механически связанной влаги и физико-химически связанной влаги из сыров при вакуумной сушке зависит от остаточного давления в вакуумной камере, в свою очередь, удаление адсорбционно-связанной влаги практически не зависит от остаточного давления в вакуумной камере, а в основном базируется на внутреннем процессе теплообмена.

При рассмотрении основных закономерностей удаления влаги при вакуумной сушке сыра с подводом теплоты была установлена необходимость разработки математической модели для расчета продолжительности процесса вакуумной сушки сыра.

Цель исследования: разработать математическую модель для расчета продолжительности процесса вакуумной сушки сыров в зависимости от температуры сушки, плотности теплового потока, величины остаточного давления и площади высушиваемого сыра.

Методы исследования. Температуру сушки твердых сычужных сыров (с массовой долей влаги 40–42 %) изменяли в пределах от 50 до

80 °С с шагом в 10 °С, тепловая нагрузка в различных экспериментах была равна: 9,2; 8,28; 7,36; 6,44; 5,52; 4,6; 3,68; 2,76; 1,84; 0,92 кВт/м².

Результаты исследования. При подводе теплоты к высушиваемому продукту наибольшей перегрев имеет поверхностный слой материала, в связи с чем процесс сушки контролировался по температуре поверхностного слоя сыра. На основании проведенных экспериментальных исследований была определена продолжительность вакуумной сушки сыров (табл.).

Установлено, что с повышением температуры сушки продолжительность процесса уменьшается. Наибольшее влияние на длительность про-

цесса сушки оказывает толщина слоя сушки, чем больше толщина слоя, тем продолжительнее процесс сушки. Приведенные в таблице сыры имели массовую долю влаги до сушки 40–42 %, после сушки – 4–5 %. Продолжительность процесса вакуумной сушки в среднем составляет 4–5 ч в зависимости от температуры сушки и толщины высушиваемого слоя. При высушивании сыров с повышенным значением массовой доли влаги 47 и 52 % продолжительность процесса вакуумной сушки увеличилась до 6 и 7 ч соответственно. Таким образом, увеличение начальной массовой доли влаги на 5 % приводит к увеличению процесса сушки на 1 ч.

Продолжительность вакуумной сушки сыров в зависимости от температуры сушки и толщины высушиваемого слоя, мин

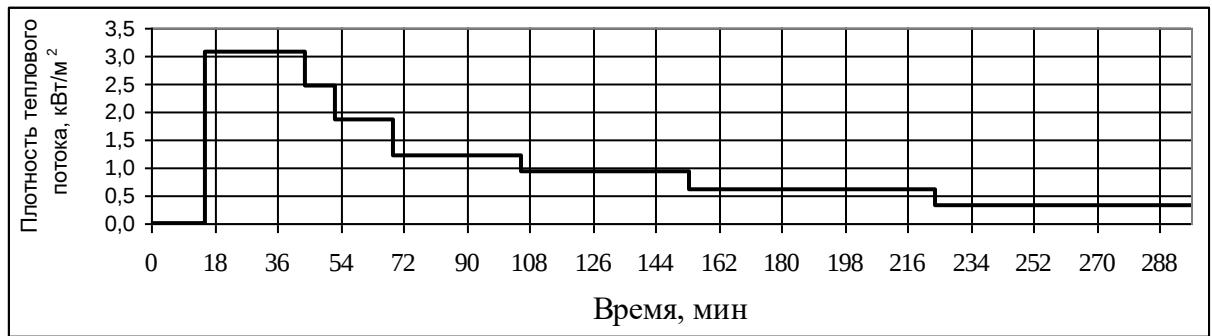
Температура сушки, °С	Толщина слоя, мм	Вид сыра				
		Советский	Швейцарский	Алтайский	Горный	Московский
50	10	280	265	290	280	270
	20	340	310	350	330	330
60	10	240	220	250	240	250
	20	300	280	300	300	290
70	10	220	200	230	220	220
	20	270	240	290	260	260
80	10	190	190	200	190	200
	20	240	230	240	240	230

На основании чего было принято считать температуру 60 °С предельно допустимой для вакуумной сушки сыров.

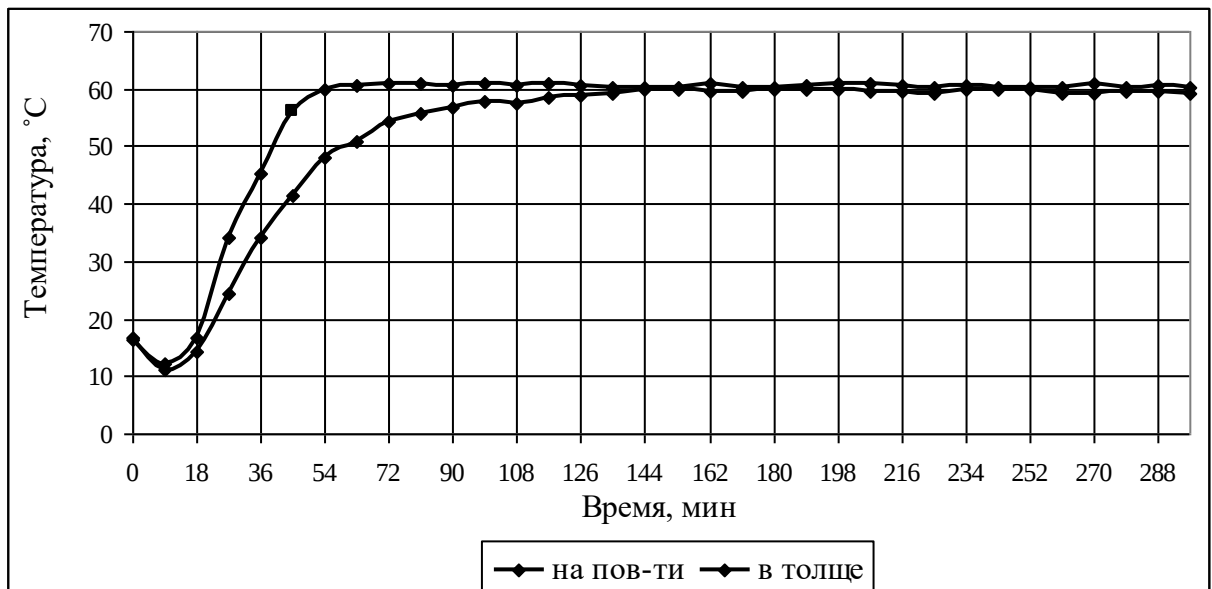
Проведение экспериментальных исследований на специально сконструированной вакуумной сушильной установке с современным функциональным комплексом регулирования и контроля параметров позволило получить характерные графики изменения плотности теплового

потока, температуры и относительной массы в процессе вакуумной сушки (рис. 2).

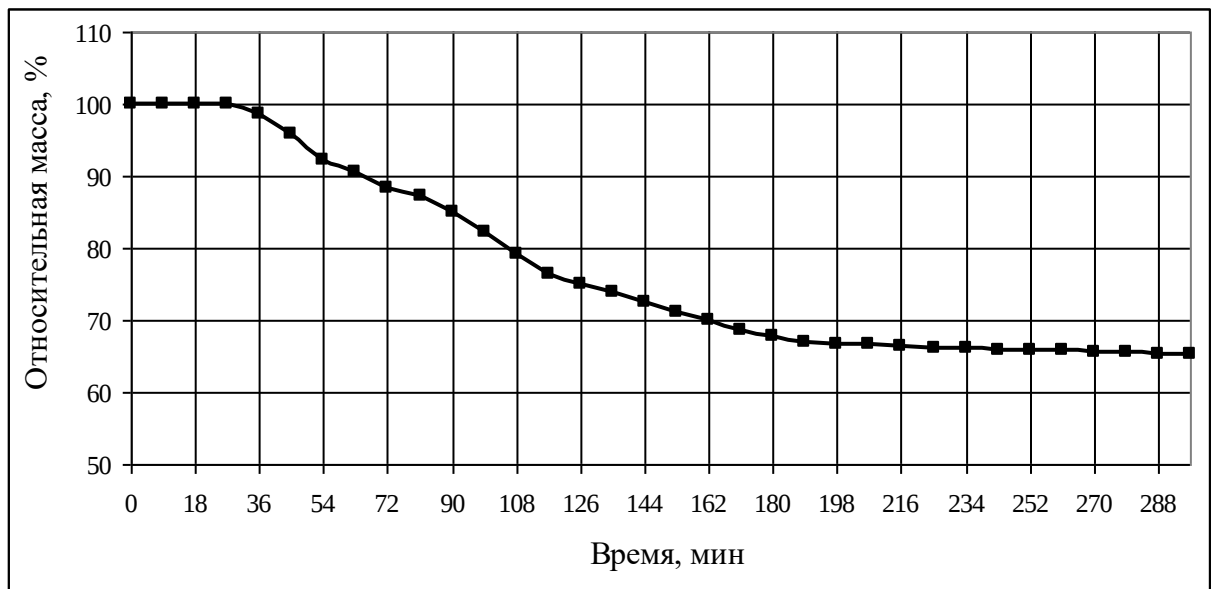
Как было установлено ранее, температура продукта в процессе сушки не превышала 60 °С. Температура внутренних слоев сыра достигала величины 60 °С через 150–160 мин. Как правило, выравнивание температуры по объему высушиваемого продукта совпадает с замедлением испарения влаги.



а



б



в

Рис. 2. Графики изменения: а – изменение плотности теплового потока; б – изменение температуры сыра; в – изменение относительной массы

Плотность теплового потока максимальна в начале процесса сушки, когда удаляется наибольшее количество влаги, с замедлением процесса испарения влаги из продукта происходит

снижение плотности теплового потока с целью предупреждения перегрева поверхностных слоев продукта.

Относительная масса снижается более чем на 35 %. После того как масса продукта не изменяется, процесс вакуумной сушки считают завершённым.

Увеличение плотности теплового потока, с одной стороны, ускоряет испарение влаги с поверхности продукта, однако, с другой – приводит к пересушиванию поверхности. Пересушенные поверхностные слои препятствуют выходу влаги из толщи продукта, что приводит к неравномерному высушиванию и снижает качество получаемого продукта.

На основании комплекса проведенных экспериментальных исследований вакуумной сушки сыров, оценки качественных показателей сухих сыров по органолептическим и физико-химическим показателям установлена рациональная величина тепловой нагрузки, равная $5,5 \text{ кВт/м}^2$.

Математическое описание реального процесса вакуумной сушки пищевых продуктов –

достаточно сложная и трудоемкая задача. Поэтому для описания данного процесса необходимо ввести некоторые основные допущения:

1) влагосодержание поверхности сыра в процессе вакуумной сушки равно текущему значению влагосодержания внутренних слоев, т. е. влагосодержание сыра по всему объему одинаково;

2) сыр поступает на сушку с одинаковыми значениями температуры и влагосодержания по всему объему;

3) для водяного пара при вакуумной сушке можно применять законы, выведенные для идеальных газов;

4) теплофизические свойства влаги, удаляемой из сыра в процессе вакуумной сушки, равны теплофизическим свойствам дистиллированной воды.

На рисунке 3 показана графическая схема вакуумной сушки сыра при инфракрасном способе подвода теплоты.

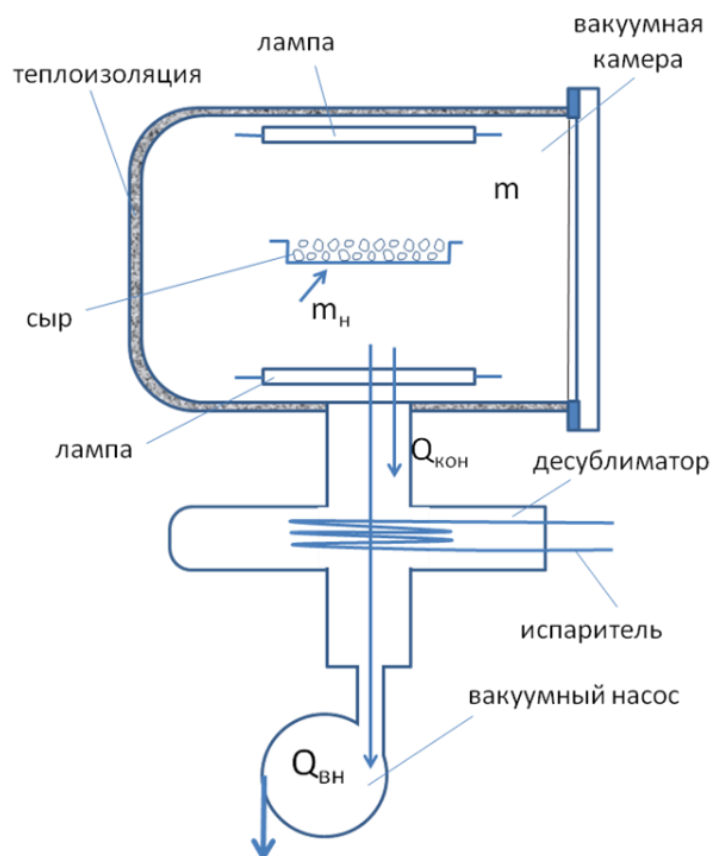


Рис. 3. Графическая схема вакуумной сушки сыра при инфракрасном способе подвода теплоты:
 m – масса водяных паров в вакуумной камере; m_n – масса сыра; $Q_{кон}$ – объемная производительность конденсатора; $Q_{вн}$ – объемная производительность вакуумного насоса

При сушке для интенсификации процесса испарения влаги к материалу подводится теплота. В процессе вакуумной сушки сыра при остаточном давлении не менее 2 кПа теплота передается конвекцией и радиацией. Уравнение теплового баланса в данном случае имеет следующий вид:

$$c_o \cdot \left(\frac{T_\kappa}{100} \right)^4 + \alpha \cdot F \cdot (t_\kappa - t_c) = r \cdot \left(\frac{du}{d\tau} \right), \quad (1)$$

где $c_o = 5,67 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; α – коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; t_κ – температура в камере, $^\circ\text{C}$; t_c – температура сыра, поступающего на сушку, $^\circ\text{C}$; r – удельная теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$; $\frac{du}{d\tau}$ – скорость сушки, $\%/ \text{мин}$.

Удельная теплота парообразования определяется по формуле

$$r = r_o + (c_{II} - c_B) \cdot (T_c - 273), \quad (2)$$

где r_o – теплота парообразования при 0°C , $\text{Дж}/\text{кг}$; c_{II} – теплоемкость пара, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; c_B – теплоемкость испаряемой влаги, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Коэффициент теплообмена конвекцией можно определить по уравнению

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta}, \quad (3)$$

где δ – толщина частицы сыра, м; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Из сушильной камеры в процессе сушки откачивается влага, испарившиеся из сыра, и воздух, попадающий в вакуумную систему через неплотности.

Необходимо получить аналитическую зависимость, которая описывает испарение влаги при вакуумной сушке. Требуемая величина остаточного давления в вакуумной системе поддерживается вакуумным насосом. Уравнение материального баланса при испарении влаги в процессе сушки имеет вид

$$q_{исп} = \rho \cdot Q_H, \quad (4)$$

где $q_{исп}$ – интенсивность испарения влаги, $\text{кг}/\text{ч}$; ρ – плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$; Q_H – производительность вакуумного насоса, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Интенсивность испарения влаги из материала в процессе сушки равна

$$q_{исп} = \frac{du}{d\tau}. \quad (5)$$

Плотность насыщенного пара определяется по уравнению

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T_\kappa}, \quad (6)$$

где P – давление газа, Па; M – молекулярная масса воды, $\text{кг}/\text{моль}$; R – универсальная газовая постоянная, равная $8314 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Подставим уравнения (5) и (6) в формулу (4), получим

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{P \cdot M \cdot Q_H}{R \cdot T_\kappa}. \quad (7)$$

Подставим уравнение (1) в равенство (7), получим уравнение тепломассопереноса:

$$\frac{d}{d\tau} \left[c_o \cdot \left(\frac{T_\kappa}{100} \right)^4 + \alpha \cdot F \cdot (t_\kappa - t_c) \right] = r \cdot \frac{P \cdot M \cdot Q_H}{R \cdot T_\kappa}. \quad (8)$$

Умножим уравнение (8) на dt и, проинтегрировав, получим:

$$c_o \cdot \left(\frac{T_\kappa}{100} \right)^4 + \alpha \cdot F \cdot (t_\kappa - t_c) = r \cdot \frac{P \cdot M \cdot Q_H}{R \cdot T_\kappa} \cdot \tau. \quad (9)$$

Выразив из уравнения (9) продолжительность сушки τ , получим:

$$\tau = \frac{\left[c_o \cdot \left(\frac{T_\kappa}{100} \right)^4 + \alpha \cdot F \cdot (t_\kappa - t_c) \right] \cdot R \cdot T_\kappa}{r \cdot P \cdot M \cdot Q_H}. \quad (10)$$

Адекватность математической модели (уравнения (10)) оценивали сравнением расчетной и экспериментальной продолжительности сушки. Среднестатистическая погрешность расчетной модели составляет 6,3 %.

Выводы. Таким образом, установлена рациональная температура вакуумной сушки твердых сычужных сыров – 60 °С, рациональная величина тепловой нагрузки – 5,5 кВт/м².

Разработана модель для расчета продолжительности процесса вакуумной сушки сыров в зависимости от температуры сушки, плотности теплового потока, величины остаточного давления и площади высушиваемого сыра. На основании аппроксимации результатов экспериментальных исследований установлено, что разработанная математическая модель имеет погрешность не более 7 %.

Полученная математическая модель для расчета продолжительности процесса вакуумной сушки сыров может быть трансформирована и преобразована для расчета продолжительности вакуумной сушки и других пищевых продуктов растительного и животного происхождения.

Литература

1. Ермолаев В.А. Вакуумное концентрирование молочно-белковых продуктов // Молочная промышленность. 2010. № 7. С. 62–63.
2. Курбанова М.Г., Ермолаев В.А. Исследование гигроскопических свойств и активности воды молочно-белковых концентратов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 8. С. 233–236.
3. Ермолаев В.А., Шушпанников А.Б. Исследование показателя активности воды сухих молочных продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2010. № 2. С. 84–88.
4. Пат. RU 2462867 C1 Российская Федерация, МПК B7/02. Способ вакуумной сушки ягод / Ермолаев В.А., Федоров Д.Е., Масленникова Г.А.; заявитель и патентообладатель Кемеровский технол. ин-т пищ. пром. – № 2011122882/13; заяв. 06.06.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28. – 5 с.
5. Семенова А.А., Иванкин А.Н., Насонова В.В. и др. Влияние вакуумной сушки на устойчивость мясной продукции к окислительной порче // Все о мясе. 2015. № 1. С. 16–19.
6. Бышов Д.Н., Каширин Д.Е., Гобелев С.Н. и др. К вопросу вакуумной инфракрасной сушки перги // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2016. № 1 (29). С. 56–59.
7. Пахомов В.И., Брагинец С.В., Бахчевников О.Н. и др. Исследование процесса вакуумной СВЧ-сушки зеленой растительной массы // Известия Горского государственного аграрного университета. 2016. Т. 53, № 4. С. 187–192.
8. Zecchi B., Clavijo L., Martínez Garreiro J., Gerla P. Modeling and minimizing process time of combined convective and vacuum drying of mushrooms and parsley // Journal of Food Engineering. 104 (1), 49–55, 2011.
9. Xie L., Mujumdar Arun S., Fang Xiao-Ming, Wang Jun Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes // Food and Bioprocess Processing, 102, 320–331, 2017.
10. Wojdylo A., Figiel A., Lech K., Nowicka P., Oszmianski J. Effects of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries // Food and Bioprocess Technology, 7, 829–841, 2014.
11. Mu Yanqiu, Zhao Xinhui, Liu Bingxin Influences of microwave vacuum puffing conditions on anthocyanin content of raspberry snack // International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 6 (3), 80–87, 2013.
12. Horszwald A., Julien H., Andlauer W. Characterisation of Aronia powders obtained by different drying processes // Food chemistry, 141 (3), 2858–2863, 2013.
13. Yuan-hui Li, Ya-ru Qi, Zhen-feng Wu. Comparative study of microwave-vacuum and vacuum drying on the drying characteristics, dissolution, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Scutellaria extract powder // Powder technology, 317, 430–437, 2017.
14. Artnaseaw A., Theerakulpisut S., Benjapiyaporn C. Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli // Biosystems Engineering, 105 (1), 130–138, 2010.

15. Mannanov U., Mamatov Sh., Shamsutdinov B. Research and study mode vacuum infrared drying vegetables // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, 3-4, 38-41, 2016.

Literatura

1. Ermolaev V.A. Vakuumnoe koncentrirovaniye molochno-belkovykh produktov // Molochnaya promyshlennost'. 2010. № 7. S. 62–63.
2. Kurbanova M.G., Ermolaev V.A. Issledovanie gigroskopicheskikh svoystv i aktivnosti vody molochno-belkovykh koncentratov // Vestnik KrasGAU. 2011. № 8. S. 233–236.
3. Ermolaev V.A., Shushpannikov A.B. Issledovanie pokazatelya aktivnosti vody suhih molochnykh produktov // Tehnika i tehnologiya pishhevykh proizvodstv. 2010. № 2. S. 84–88.
4. Pat.RU 2462867S1 Rossiyskaya Federaciya, MPK V7/02. Sposob vakuumnoy sushki yagod / Ermolaev V.A., Fedorov D.E., Maslennikova G.A.; zayavitel' i patentoobladatel' Kemerovskiy tekhnol. In-t pishch. Prom. – № 2011122882/13; zayav. 06.06.2011; opubl. 10.10.2012, Byul. № 28. – 5 s.
5. Semenova A.A., Ivankin A.N., Nasonova V.V. i dr. Vliyanie vakuum-noy sushki na ustojchivost' mjasnoj produkcii k oksiditel'noj porche // Vse o mjase. 2015. № 1. S. 16–19.
6. Byshov D.N., Kashirin D.E., Gobelev S.N. i dr. K voprosu vakuumnoy infrakrasnoj sushki pergi // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo agrotehnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. 2016. № 1 (29). S. 56–59.
7. Pahomov V.I., Braginets S.V., Bahchevnikov O.N. i dr. Issledovanie processa vakuumnoy SVCh-sushki zelenoj rastitel'noj massy // Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. T. 53, № 4. S. 187–192.
8. Zecchi B., Clavijo L., Martínez Garreiro J., Gerla P. Modeling and mini-mizing process time of combined convective and vacuum drying of mushrooms and parsley // Journal of Food Engineering. 104 (1), 49-55, 2011.
9. Xie L., Mujumdar Arun S., Fang Xiao-Ming, Wang Jun Far-infrared ra-diation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes // Food and Bioproducts Processing, 102, 320-331, 2017.
10. Wojdylo A., Figiel A., Lech K., Nowicka P., Oszmianski J. Effects of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries // Food and Bioprocess Technology, 7, 829–841, 2014.
11. Mu Yanqiu, Zhao Xinhui, Liu Bingxin Influences of microwave vacuum puffing conditions on anthocyanin content of raspberry snack // International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 6 (3), 80-87, 2013.
12. Horszwald A., Julien H., Andlauer W. Characterisation of Aronia pow-ders obtained by different drying processes // Food chemistry, 141 (3), 2858-2863, 2013.
13. Yuan-hui Li, Ya-ru Qi, Zhen-feng Wu. Comparative study of micro-wave-vacuum and vacuum drying on the drying characteristics, dissolution, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Scutellaria extract powder // Powder technology, 317, 430-437, 2017.
14. Artnaseaw A., Theerakulpisut S., Benjapiyaporn C. Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli // Biosystems Engineering, 105 (1), 130-138, 2010.
15. Mannanov U., Mamatov Sh., Shamsutdinov B. Research and study mode vacuum infrared drying vegetables // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, 3-4, 38-41, 2016.

