

Исследование процесса вакуум-сублимационного обезвоживания пищевых продуктов при различных способах энергоподвода

Д-р техн. наук С.Т. АНТИПОВ, А.А. ВОРОНИН, А.С. КУМИЦКИЙ, В.В. ПОЙМАНОВ
Воронежская государственная технологическая академия

The main directions for decrease of power intensity of foods vacuum freeze drying process are considered. The investigations of the process of vacuum-sublimating dehydration with the combined use of inert gases and microwave frequency power supply were conducted. The curves and rates of drying and the thermograms for beer yeast and plant extracts with different methods of power supply have been obtained.

Одним из основных факторов развития экономики нашей страны является использование высокоинтенсивных и энергосберегающих технологий и современного оборудования, соответствующего мировым стандартам. К таким технологиям можно отнести консервирование материалов методом вакуум-сублимационного обезвоживания. Поэтому в настоящее время совершенствование производства сублимированных микробиологических и пищевых продуктов является актуальной задачей.

Ведущие зарубежные фирмы (Nestle, Atlas, Danone и др.) выпускают десятки видов таких продуктов, причем их доля в общем объеме производства в последние годы увеличивается.

В Российской Федерации сублимированные материалы выпускаются рядом компаний, однако существующие технологии и техническое оснащение этих предприятий не позволяют им выйти на значительные объемы производства.

В последние годы усилия ученых направлены на создание экологически безопасного оборудования для вакуум-сублимационного обезвоживания пищевых и микробиологических продуктов с эффективным использованием различных источников и способов подвода энергии, что позволит реализовать ресурсосберегающие технологии и снизить энергоемкость процесса сушки.

Подвод энергии к внутренним слоям продукта традиционными способами — кондукцией и ИК-излучением — затруднен. Поэтому нами предлагается использовать при сушке объемные способы

подвода энергии с помощью различных полей, в частности поля СВЧ, а для транспортирования испарившихся молекул воды из внутренних слоев — инертные газы, которые дополнительно могут выступать как конвективная составляющая энергоподвода. Исходя из вышеизложенного, был предложен способ сублимационной сушки пищевых продуктов в поле СВЧ с применением криогенных жидкостей и их паров в качестве инертных носителей [5], осуществляемый следующим образом (рис. 1).

Исходный продукт подается в загрузочное устройство предварительно включенного экструдера I. Во время нахождения в нем во избежание раз-

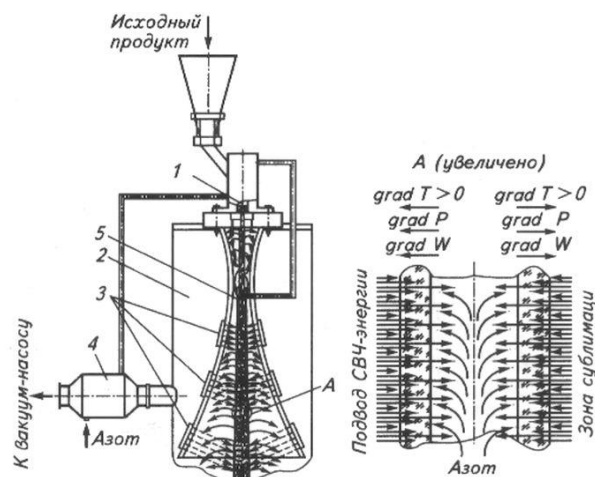


Рис. 1. Сублимационная сушилка:
1 — экструдер; 2 — сублимационная камера;
3 — магнетроны; 4 — десублиматор; 5 — канал для подачи паров азота

брызгивания при испарительном замораживании продукт охлаждается до температуры, близкой к криоскопической, поступающими из десублиматора парами азота, которые, в свою очередь, нагреваются и поступают в сублимационную камеру в качестве теплоносителя и транспортера влаги. С целью предотвращения замерзания продукта в формирующей матрице экструдера ввод экструдата в сублимационную камеру осуществляют через насадку сублимационной камеры 2, канал которой выполнен в форме сопла Лавала. В этом случае экструдат поступает в зону с давлением выше тройной точки. В зоне гидравлического затвора предлагается установить соосно соплу канал 5 для ввода в центр получаемого жгута паров азота. Далее продукт перемещается в зону с давлением ниже тройной точки, где происходит процесс самозамораживания. Полученный жгут продукта при этом приобретает форму трубы, внутри которой инертный носитель имеет возможность перемещаться, доставляя энергию, необходимую для проведения процесса сублимации, и уносить сублимированную влагу, проходя через слой продукта. Параллельно с испарительным замораживанием экструдата продукт подвергают сублимационной сушке в зоне действия источников СВЧ-энергии (магнетронов) 3 с окончательным образованием высокоразвитой пористой структуры за счет интенсивной сублимации влаги. Сублимированная влага вместе с неконденсирующимися газами откачиваются вакуум-насосом через десублиматор 4, криопанели которого охлаждаются за счет испарения жидкого азота и перегрева его паров.

Таким образом, предлагаемый способ и установка имеют следующие преимущества:

- ✓ осуществление сублимации влаги из экструдата в сверхвысокочастотном поле с одновременным испарительным замораживанием и использованием инертного носителя значительно ускоряет процесс сублимационной сушки и позволяет снизить энергозатраты на ее проведение за счет исключения энергоемкой холодильной машины, обеспечивающей низкую температуру на панели десублиматора;

- ✓ использование сочетания СВЧ-энергии и энергии паров азота дает возможность значительно увеличить градиент температуры по слою продукта,

причем этот градиент направлен в ту же сторону, что и градиенты влаги и давления;

- ✓ получение жгута в форме трубы дает возможность осуществлять равномерную доставку паров азота к продукту на всем протяжении процесса сушки;

- ✓ более качественное разделение паров воды и неконденсирующихся газов в десублиматоре за счет более низкой температуры криопанелей позволяет значительно увеличить срок службы вакуум-насоса;

- ✓ обеспечение образования жгута продукта правильной цилиндрической формы, что исключает локальное вспучивание;

- ✓ интенсификация процесса за счет высокого сушильного потенциала паров азота.

Для изучения механизма удаления влаги предложенным способом были проведены экспериментальные исследования, позволяющие оценить эффективность и целесообразность комбинированного использования инертных газов и СВЧ-энергоподвода. В результате получены кривые кинетики сушки экстракта каркаде (рис. 2).

В вакуумных аппаратах затруднен отбор проб исследуемого продукта для определения текущей влажности, поэтому для построения кривых сушки использовали весы, размещаемые в сушильной камере. Полученные таким образом текущие значения массы пересчитывали в значения текущей влажности по убыли массы. При этом за основу расчета брали одно из значений влажности — начальное или конечное, а другое служило критерием точности постановки эксперимента [4].

В опытах возникали погрешности измерений, связанные с вибрацией весов, вызванной работой вакуум-насоса и компрессора холодильной машины, что существенно влияло на характер кривых сушки.

Для устранения этого недостатка была использована методика построения кривой сушки [4], в основу расчета которой приняты оба значения влажности — начальное и конечное. Это позволило распределить погрешность эксперимента на всю длину кривой сушки, снижая ошибку при дальнейшей ее обработке.

Текущую влажность материала вычисляли по отношению массы влаги в продукте к массе абсолютно сухого вещества:

$$W_i^c = \frac{G_i - g_c}{g_c} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где G_i — текущая масса продукта, кг;

g_c — масса сухих веществ, кг.

Данная формула позволяет получать значения текущей влажности W_i^c , по которым строится кривая сушки в координатах $W^c - \tau$, по экспериментальным данным текущего показания весов G_i .

При этом массу абсолютно сухого вещества находили по формуле

$$g_c = \left[(G^{\text{нач}} - G^{\text{кон}}) \frac{100 - W^{\text{кон}}}{W^{\text{нач}} - W^{\text{кон}}} \right] (1 - 0,01 W^{\text{нач}}), \quad (2)$$

где $G^{\text{нач}}$, $G^{\text{кон}}$ — показания весов соответственно в начале и конце сушки, кг;

$W^{\text{нач}}$, $W^{\text{кон}}$ — относительная влажность продукта до и после сушки, %.

По мнению ряда авторов, повышение начальной влажности продукта ведет к увеличению количества влаги, которое необходимо удалить сублимацией, а следовательно, и к росту продолжительности сушки [3].

Однако в [2] указывается на то, что увеличение

исходной концентрации сухих веществ может усложнить удаление влаги из материала.

В экспериментах сушка проводилась в условиях нагрева продукта до температуры 36°C , так как превышение данного значения губительно для термолабильного продукта. Сушку осуществляли с предварительным самозамораживанием продукта при следующих режимных параметрах процесса: напряженность электромагнитного поля $E = 3,5$ кВ/м, остаточное давление $P = 65...80$ Па, температура паров азота $T = 268...298$ К и температура десублиматора 40°C . Такой выбор напряженности поля связан с тем, что дальнейшее ее увеличение приводило к возникновению “коронных” разрядов, вызывавших неравномерный нагрев и порчу продукта. Выбор нижнего предела температуры паров азота обусловлен тем, что, являясь сушильным агентом, азот должен иметь температуру, при которой давление насыщенных водяных паров меньше, чем давление насыщенных водяных паров над продуктом, т.е. обладать сушильным потенциалом. Выбор верхней границы температуры паров азота основан на том, что пары нагреваются в теплообменнике за счет энергии, полу-

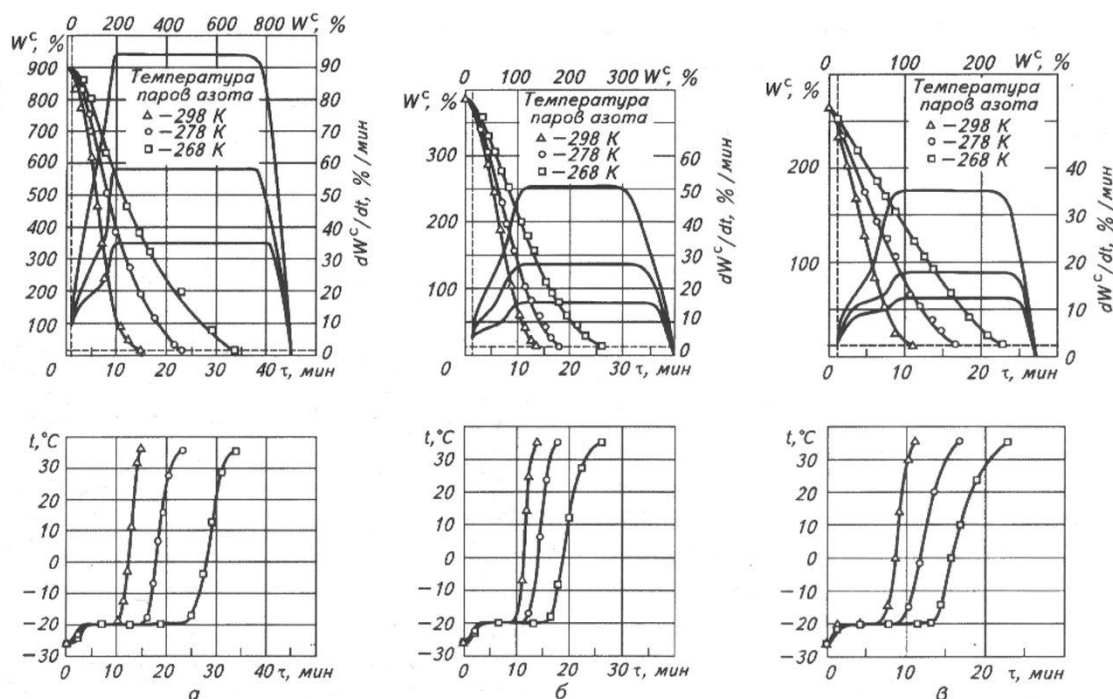


Рис.2. Кривые сушки экстракта каркаде при различной начальной концентрации сухих веществ:

а — $C_c = 10\%$; б — $C_c = 21\%$; в — $C_c = 27\%$

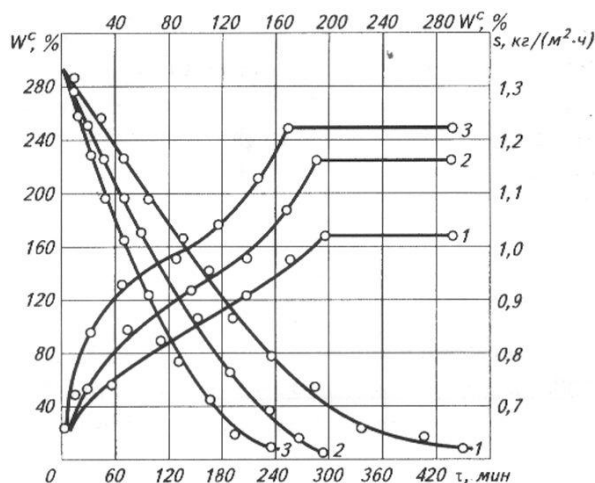


Рис. 3. Кривые сушки и скорости сушки пивных дрожжей при различных способах энергоподвода:

1 — кондуктивный, $q=0,8 \text{ кВт/м}^2$; 2 — кондуктивный, $q=1,3 \text{ кВт/м}^2$; 3 — комбинированный, $q=0,7 \text{ кВт/м}^2$ и $q=0,8 \text{ кВт/м}^2$

чаемой от продукта, температура которого в начальный момент времени не превышает температуры окружающей среды.

Из кривых сушки исследуемого продукта с исходной концентрацией сухих веществ 10, 21 и 27 % (см. рис. 2) видно, что начальная влажность в незначительной степени влияет на продолжительность сушки. Это объясняется малой разницей в количестве испаряемой влаги, так как масса воды в продукте практически равна или немного больше массы сухих веществ. Также увеличение количества испаряемой влаги в более влажном продукте компенсируется ростом продолжительности сушки менее влажного препарата в связи со снижением выделяемой в нем энергии за счет внутренних источников тепла.

Видно, что чем меньше температура паров азота, тем на кривых менее выражен период прогрева. Это объясняется тем, что преобладает СВЧ-энергоподвод, при котором продукт прогревается очень быстро по всему объему.

Продолжительность периода вакуумной досушки (удаляется невымороженная влага, период падающей скорости сушки — после точки перегиба выпуклостью к оси ординат) при различной концентрации сухих веществ в исследуемом продукте практически не различается. Однако при уменьшении температуры паров азота кривые в этом пери-

оде становятся более пологими, т.е. скорость сушки падает.

Для повышения эффективности процесса вакуум-сублимационного обезвоживания и снижения его энергоемкости перспективным представляется использование термоэлектрических элементов, преимуществами которых являются экологическая чистота, отсутствие промежуточных газообразных и жидких хладагентов, независимость от ориентации в пространстве, бесшумность, широкие возможности миниатюризации, переход из режима охлаждения в режим нагревания и обратно за счет простого реверсирования тока [1].

Предлагаемая сушилка позволяет [6]:

- ✓ понизить энергозатраты процесса сублимационной сушки на 25 — 30 % за счет использования термоэлектрических элементов в качестве встроенных десублиматоров;
- ✓ достигнуть равномерности процесса сушки благодаря созданию одинакового давления в секциях;
- ✓ интенсифицировать процесс сушки за счет достижения более глубокого вакуума в секциях, а также за счет использования термоэлектрических модулей с высокой плотностью теплового потока q (рис. 3).

Список литературы

1. Антипов С.Т., Пойманов В.В. Энергосберегающий способ вакуум-сублимационной сушки // Техника машиностроителя. 2001. № 1.
2. Гуйго Э.И., Журавская Н.К., Каухчешвили Э.И. Сублимационная сушка в пищевой промышленности. — 2-е изд., доп. и перераб. — М., 1972.
3. Лебедев Д.П., Перельман Т.Л. Тепло- и массообмен в процессах сублимации в вакууме. — М.: Энергия, 1973.
4. Николаенко С.В. Повышение эффективности сублимационной сушки ферментных препаратов: Автореф. дис...канд. техн. наук. 05.18.12; науч. рук. Кретов И. Т. — Воронеж: ВГТА, 1990.
5. Патент 2275564 РФ. Способ получения сублимированных продуктов и устройство для его осуществления / В.Е. Добромиров, А.Ф. Брехов, С.В. Шахов, А.С. Белозерцев, А.С. Кумицкий, И.С. Моисеева, С.А. Бокадаров. Оpubл. 27.04.2006, Бюл. № 12.
6. Пойманов В.В., Санин В.Н. Оценка эффективности применения термоэлектрических модулей в сублимационной установке // Холодильная техника. 1999. № 2.