

# Метод расчета интенсивности процесса сублимационной сушки шубата и кумыса

Канд. техн. наук А.У. ШИНГИСОВ, академик НАН РК, д-р техн. наук У.Ч. ЧОМАНОВ  
РГП «Научно-производственный центр перерабатывающей и пищевой промышленности»

*A calculation method of the freeze-drying process intensity of shubat and kumiss is presented in the article. The difference in water activity and relative humidity of the air was chosen as a driving force of the process. For the verification of the calculation method an experimental installation was developed and manufactured.*

Вакуум-сублимационная сушка продуктов является сложным технологическим процессом, для которого характерны одновременно протекающие явления тепло- и массообмена, в результате чего изменяются свойства продукта.

Интенсивность протекания технологического процесса во многом определяется правильным выбором движущей силы, что позволяет как совершенствовать методику его расчета, так и принимать рациональные режимы сушки.

Для выяснения физической природы движущей силы процесса сублимационной сушки остановимся на термодинамическом методе анализа явления переноса тепла и массы.

Из термодинамики известно [1, 5], что любой процесс переноса тепла и массы обуславливается некой движущей (термодинамической) силой  $X$ , выраженной обычно градиентом потенциала. Эта сила вызывает термодинамический необратимый поток субстанции (теплоты, массы и др.), интенсивность (плотность) которого  $j$  согласно теории Онзагера линейно зависит от термодинамической силы  $X$ :

$$j = \sum_{k=1}^n L_{j,k} X_k, \quad (1)$$

где  $L_{j,k}$  – коэффициент пропорциональности, определяющий в общем случае способность среды проводить поток субстанции (кинетические коэффициенты).

Так, по закону теплопроводности Фурье градиент температуры вызывает поток теплоты  $j = -\chi \text{ grad } t$ ,  $L = \chi$ ; по закону Фика градиент концентрации  $C$  вызывает диффузию  $j = -D \text{ grad } C$ ,  $L = D$  и т.д. Наряду с этими процессами переноса возникают и сопряженные с ними процессы, например при существовании градиента температуры кроме переноса теплоты может происходить и перенос массы. Плотность потока массы  $j$  при нали-

чии градиента концентрации и градиента температуры равна

$$j = -L_{11} \text{ grad } C - L_{12} \text{ grad } T. \quad (2)$$

При вакуум-сублимационной сушке [3, 4] для расчета процесса переноса тепла и массы в качестве движущей (термодинамической) силы выбирают разность температур, концентраций (влагодержаний), давлений и другие параметры.

К сожалению, использование вышеперечисленных термодинамических параметров в качестве движущей силы не всегда в полном объеме раскрывает особенности закономерностей переноса тепла и массы при сублимационной сушке продуктов в вакууме.

С позиции молекулярно-кинетической теории при сублимационной сушке влага в замороженных продуктах под действием движущей термодинамической силы мигрирует к поверхности раздела фаз. На поверхности твердого тела молекула воды последовательно перемещается от впадин к выпуклостям микрорельефа, постепенно уменьшая число «соседей» и снижая энергетические связи с твердым телом. Далее молекула воды переходит в жидкий двойной электрический слой, из него – в замороженный слой свободной воды, а от туда – в его окружающую среду.

По закону сохранения масс количество испарившейся влаги с поверхности должно быть равно количеству диффундировавшей влаги из внутренних слоев продукта.

Согласно принципу неравновесной термодинамики при сублимации навстречу диффундирующему водяному пару должен диффундировать сухой воздух к поверхности фазового перехода, которая для него является непреодолимой преградой. Вследствие этого концентрация сухого воздуха у поверхности возрастает, что при определенных условиях приводит к возникновению эффекта конвективного потока, называемого потоком

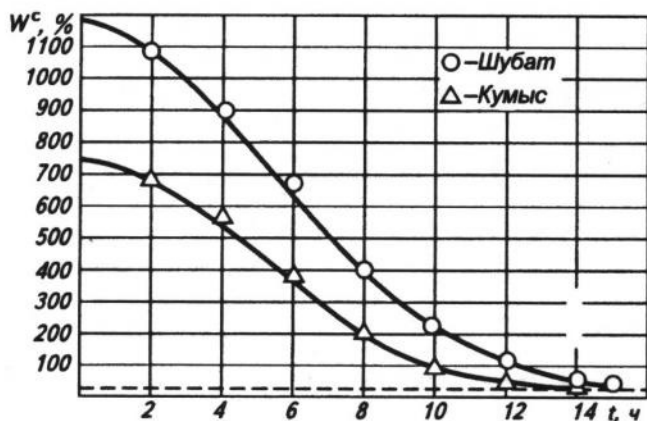


Рис. 1. Кривые сушки шубата и кумыса:

$W^c$  – влажность продукта по сухому остатку;  $t$  – время

Стефана. С учетом этого интенсивность испарения влаги с поверхности тела, учитывающая как конвективный, так и диффузионный поток пара, определяется уравнением Дальтона

$$j = \sigma(d''_{\Pi} - \varphi d''_B), \quad (3)$$

где  $\sigma$  – коэффициент испарения влаги с поверхности продукта;

$d''_{\Pi}$ ,  $d''_B$  – влагосодержание насыщенного воздуха соответственно на поверхности тела и вдали от нее.

Представив влагосодержания  $d''_{\Pi}$ ,  $d''_B$  через парциальные давления водяных паров  $P''_{\Pi}$  и  $P''_B$  и барометрическое давление  $B$ , после некоторых математических преобразований выражение (3) примет вид

$$j = \eta(a_w - \varphi), \quad (4)$$

где  $\eta$  – кинетический коэффициент, характеризующий скорость переноса массы в данных условиях [ $\eta = 0,622\sigma/B$ , кг/(м<sup>2</sup>·с·Па)];

$a_w$  – активность воды;

$\varphi$  – относительная влажность воздуха.

Из представленного выражения (4) нетрудно заметить, что движущая сила процесса ( $a_w - \varphi$ ) положительна в случае когда  $a_w > \varphi$ , что указывает на миграцию влаги из продукта в окружающую среду. При условии  $a_w = \varphi$  правая часть уравнения (4) равна нулю, что свидетельствует о прекращении явлений переноса влаги из материала в окружающую среду и установлении термодинамического равновесия. Если  $a_w < \varphi$ , выражение принимает отрицательное значение, это по физическому смыслу означает, что перемещение влаги протекает в обратном направлении.

Для изучения интенсивности протекания процессов тепло- и массообмена при сублимационной сушке национальных кисломолочных продуктов шубата и кумы-

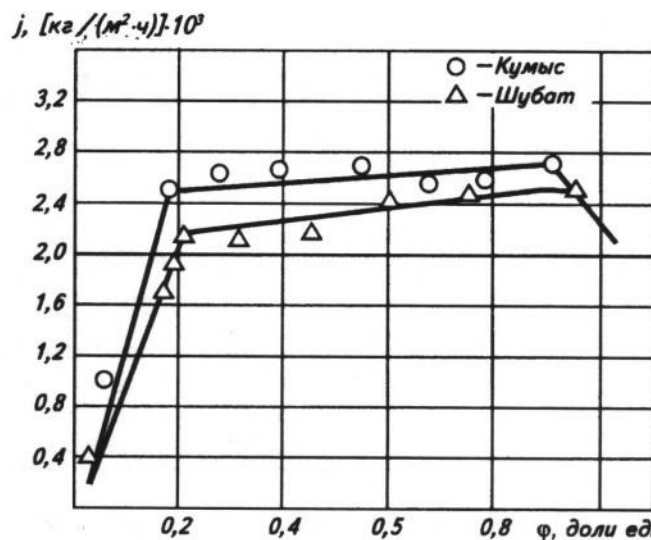


Рис. 2. Зависимость скорости сушки от влажности:

$j$  – интенсивность сушки;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха

са была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Описание установки и методика проведения эксперимента подробно описаны в работе [6].

Результаты, связанные с оценкой интенсивности сублимационной сушки по предложенной зависимости, представлены на рис. 1 и 2.

Результаты, полученные расчетным путем и в результате эксперимента, показывают хорошую сходимость, что позволяет говорить о корректности предлагаемого уравнения для описания интенсивности протекания сублимационной сушки.

#### Список литературы

1. Базаров И.П. Термодинамика – М.: Высшая школа, 1991.
2. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1973.
3. Гуйго Э.М., Журавская Н.К., Каухчешвили Э.И. Сублимационная сушка пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1972.
4. Камовников Б.П., Антипов А.В., Семенов Г.В., Бабаев И.А. Атмосферная сублимационная сушка пищевых продуктов. – М.: Колос, 1994.
5. Кириллин В.А. Термодинамика растворов. – М.: Энергия, 1980.
6. Чоманов У.Ч., Шингисов А.У., Тимурбекова А.К. Исследование влияния магнитного поля на процесс сублимационной сушки в СВЧ-поле молочных продуктов // Пищевая технология и сервис. – Алматы. 2003. № 2.