

УДК 532.516: 536.24

НИКИТЕНКО Н.И., СНЕЖКИН Ю.Ф., СОРОКОВАЯ Н.Н.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕЖИМЫ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Подається спосіб конвективної сушки термолабільних матеріалів, що забезпечує мінімальний час процесу, не погіршуючи при цьому якості готової продукції. Проводиться дослідження впливу початкової температури сушильного агента та товщини матеріалу, який зневоднюється, на тривалість сушки та залежність температури сушильного агента від часу.

Излагается способ конвективной сушки термолабильных материалов, который обеспечивает минимальное время процесса, не ухудшая при этом качества готового продукта. Проводится исследование влияния начальной температуры сушильного агента и толщины обезвоживаемого материала на продолжительность сушки и зависимость температуры сушильного агента от времени.

The way of convective drying of thermolabile materials which provides minimal process time, without deterioration of quality of ready product is stated. Research of influence of initial temperature of the drying agent and thickness of a dewatering material on the drying duration and dependence of drying agent temperature on time is carried out.

$A$  – энергия активации молекул, Дж;  
 $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  
 $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  
 $I$  – интенсивность испарения, кг/(м<sup>3</sup>·с);  
 $J$  – плотность потока массы, кг/(м<sup>2</sup>·с);  
 $L$  – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;  
 $P$  – давление, Па;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);  
 $t$  – время, с;  
 $T$  – температура, К;  
 $U$  – объемная концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  
 $w$  – скорость, м/с;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\delta$  – характерный геометрический параметр тела;  
 $\gamma_c$  – поверхностный коэффициент фазового превращения, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$\gamma_V$  – объемный коэффициент фазового превращения, кг/(м<sup>3</sup>·с);  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  
 $v$  – нормаль к граничной поверхности;  
 $\Pi$  – объемная пористость тела;  
 $\rho$  – плотность компонента, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\varphi$  – степень насыщения парогазовой смеси;  
 $\Psi$  – объемная доля компонента;  
 $\omega$  – удельное массосодержание, кг/кг.

### Индексы:

$v$  – воздух;  
 $p$  – пар;  
 $g$  – газ;  
 $ж$  – жидкость;  
 $n$  – насыщенное состояние;  
 $c$  – внешняя среда;  
 $t$  – твердое пористое тело;  
 $0$  – начальное значение;  
 $эф$  – эффективное значение.

### Введение

Производство пищевых продуктов необходимого качества требует досконального знания особенностей технологии и отдельных ее процессов. Особенно это касается такого энергоемкого процесса как сушка, который существенно влияет не только на энергетические показатели производст-

ва, но и на качество готовых пищевых продуктов. Разработка энерго- и ресурсосберегающих сушильных технологий, эффективных методов управления процессами обезвоживания пористых материалов, а также прогнозирование их качества является на сегодняшний день актуальной задачей.

Подавляющее большинство продуктов питания, подвергаемых сушке, относятся к термолабильным материалам, для которых существует некоторый предел температуры – так называемая предельно допустимая температура  $T^*$ , превышение которой приводит к существенному ухудшению качества готового продукта. Проведение обезвоживания при относительно невысокой температуре  $T^*$  существенно удлиняет процесс и снижает его эффективность. На начальной стадии процесса сушки, когда в порах материала в окрестности наружной границы тела содержится достаточное количество влаги, применение высокотемпературного сушильного агента, вообще говоря, является безопасным. Таким образом, интенсифицировать процесс удаления влаги из биотермолабильных материалов возможно путем изменения температуры теплоносителя в процессе сушки.

Известны различные способы конвективной сушки термолабильных материалов, в которых предусматривается ступенчатое изменение температуры сушильного агента [1, 2]. При их описании задается температура, влагосодержание и скорость движения теплоносителя, а также время его воздействия на материал на каждой ступени процесса обезвоживания. Эти способы сушки могут применяться лишь для конкретных материалов и определенного диапазона значений указанных параметров. Они не являются универсальными, поскольку время протекания процесса сушки существенно зависит от многих факторов: от начальных значений влагосодержания и температуры материала, его геометрических и теплофизических параметров, от температуры, влажности и скорости сушильного агента.

При организации ступенчатых способов сушки возможно превышение температуры материала по отношению к предельно допустимой, что ведет к ухудшению его качества, а также протеканию процесса сушки при температуре, которая ниже предельно допустимой, что связано с увеличением времени сушки и, следовательно, с потерями энергии.

### **Цели исследования**

В [3] предложен новый ресурс- и энергосберегающий способ сушки термолабильных материа-

лов, который предусматривает изменение температуры сушильного агента и проводится в два этапа. На первом этапе обезвоживание осуществляется путем обдува материала сушильным агентом с постоянной температурой  $T_c$ , которая, как правило, существенно выше предельно допустимой  $T^*$  для данного материала. Когда температура на наружной границе тела достигает значения  $T^*$ , первый этап сушки завершается. На втором этапе сушки на внешней границе тела поддерживается постоянная температура, равная предельно допустимой  $T^*$ , что достигается путем изменения температуры сушильного агента. Данный способ обеспечивает минимальное время сушки при заданных значениях предельно допустимой температуры и максимальной температуры сушильного агента, и следовательно – снижение энергетических потерь.

Для управления процессом сушки необходимо располагать графиком изменения температуры сушильного агента или других параметров, влияющих на интенсивность его теплообмена с влажным телом. Этот график должен определяться в зависимости от вида материала, его начальных значений температуры и влагосодержания, геометрических и теплофизических параметров материала, от скорости, температуры и влажности сушильного агента и некоторых других параметров. Экспериментальное определение такого рода графиков сопряжено со значительными трудностями. Более рациональный путь их получения базируется на применении методов математического моделирования динамики процессов тепломассопереноса при обезвоживании пористых систем.

### **Метод исследования**

Большинство термолабильных материалов представляют собой коллоидные капиллярно-пористые тела, объем которых в процессе сушки уменьшается в несколько раз, что оказывает существенное влияние на динамику процессов тепломассопереноса и фазовых превращений. В [4] сформулирована математическая модель и разработан численный метод расчета динамики и кинетики тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при обезвоживании коллоидных капиллярно-пористых тел.

Уравнения тепло- и массопереноса, входящие в математическую модель построены на основе дифференциального уравнения переноса субстанции (массы компонентов, энергии), полученного на базе законов сохранения и основных положений механики деформируемого тела  $\frac{\partial W}{\partial t} = -\nabla J_w + I_w - \frac{W}{1 + \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}$ , которое при отсутствии деформаций ( $\varepsilon_V = 0$ ), переходит в известное уравнение Умова. Относительная объемная деформация  $\varepsilon_V$  в окрестности данной точки тела при известных значениях функций температуры  $T$  и объемных концентраций  $U_\psi$  жидкости ( $\psi = ж$ ), пара ( $\psi = п$ ) и воздуха ( $\psi = в$ ) может быть найдена на основе уравнения термokonцентрационного деформирования [5].

В общем случае плотность потока  $J_w$  субстанции  $W$  имеет диффузионную  $J_w^d$  и фильтрационную  $J_w^f$  составляющие:  $J_w = J_w^d + J_w^f$ .

Интенсивность  $I$  фазового перехода жидкости в пар в граничных точках влажного пористого тела определяется по выражению, которое получено на базе закона интенсивности спектрального излучения микрочастиц тела [6]

$$I = \gamma_c \left\{ \left[ \exp\left(\frac{A}{RT}\right) - 1 \right]^{-1} - \varphi_c \left[ \exp\left(\frac{A}{RT_c}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $\gamma_c$  – поверхностный коэффициент интенсивности испарения;  $\varphi_c$  – степень насыщения паро-газовой смеси,  $\varphi_c = P_n / P_n(T_c)$ . В конце первого периода сушки объемная концентрация жидкости в окрестности граничной поверхности стремится к нулю. При этом влажность  $\varphi$  парогазовой смеси в порах тела, а следовательно и интенсивность испарения  $I$  снижаются. Из уравнения сохранения массы для элементарного объема, примыкающего к граничной поверхности тела, следует, что когда  $U_{ж}|_{v=0} \rightarrow 0$ , вся жидкость, которая подходит к поверхности испаряется и результирующий поток пара равен

$$I = -D_{ж} \frac{\partial U_{ж}}{\partial x} \Big|_{v=0}. \quad (2)$$

При условии, что температуры фаз в каждой точке тела совпадают, интенсивность испарения жидкости в единичном объеме пористого тела с учетом (1) находится по выражению

$$I_V = \gamma_V \left[ \exp\left(\frac{A}{RT}\right) - 1 \right]^{-1} (1 - \varphi), \quad (3)$$

где  $\gamma_V$  – коэффициент объемного испарения,  $\varphi = P_n / P_n(T_n)$ .

Система уравнений, описывающих взаимосвязанные процессы тепломассопереноса при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов имеет вид:

$$c_{эф} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + w_{эф} \nabla T \right) = \nabla (\lambda_{эф} \nabla T) - L \gamma_V \left[ \exp\left(\frac{A}{RT}\right) - 1 \right]^{-1} (1 - \varphi), \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_{ж}}{\partial t} + \nabla (w_{ж} U_{ж}) = \nabla [D_{ж} (\nabla U_{ж} + \delta_{ж} \nabla T)] - \gamma_V \left[ \exp\left(\frac{A}{RT}\right) - 1 \right]^{-1} (1 - \varphi) - \frac{U_{ж}}{1 + \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial U_{п}}{\partial t} + \nabla (w_{п} U_{п}) = \nabla [D_{п} (\nabla U_{п} + \delta_{п} \nabla T)] + \gamma_V \left[ \exp\left(\frac{A}{RT}\right) - 1 \right]^{-1} (1 - \varphi) - \frac{U_{п}}{1 + \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial U_{в}}{\partial t} + \nabla (w_{в} U_{в}) = \nabla [D_{в} (\nabla U_{в} + \delta_{в} \nabla T)] - \frac{U_{в}}{1 + \varepsilon_V} \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t}. \quad (7)$$

Здесь эффективные значения скорости связанного вещества, теплоемкости и теплопроводности тела определяются следующими выражениями:

$$w_{эф} = [w_{ж} - c_{ж} U_{ж} + w_{г} (c_{п} U_{п} + c_{в} U_{в})] / c_{эф};$$

$$c_{эф} = c_{т} U_{т} + c_{ж} U_{ж} + c_{п} U_{п} + c_{в} U_{в};$$

$$\lambda_{эф} = \lambda_{т} U_{т} / \rho_{т} + \lambda_{ж} U_{ж} / \rho_{ж} + \lambda_{п} U_{п} / \rho_{п} + \lambda_{в} U_{в} / \rho_{в};$$

$$\varphi = \varphi_n / [\Psi_{г} P_n(T)].$$

Уравнение (4) получено путем комбинирования уравнения переноса субстанции, записанного для энергии, и уравнений переноса массы (5)-(7).

Для системы уравнений (4)-(7) на первом этапе сушки граничные условия тепло- и массообмена

третьего рода при заданных параметрах сушильного агента формулируются следующим образом:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial v} \Big|_{v=0} = \alpha(T_c - T|_{v=0} - L I), \quad (8)$$

$$D_{\text{ж}} \left( \frac{\partial U_{\text{ж}}}{\partial v} \Big|_{v=0} + \delta_{\text{ж}} \frac{\partial T}{\partial v} \Big|_{v=0} \right) + J_{\text{ж}}^{\phi} \Big|_{v=0} = I, \quad (9)$$

$$-D_{\text{п}} \left( \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial v} \Big|_{v=0} + \delta_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial v} \Big|_{v=0} \right) + J_{\text{п}}^{\phi} \Big|_{v=0} = \gamma_{\text{сп}} (U_{\text{п}} \Big|_{v=0} - \rho_{\text{пс}} \Psi_{\text{п}}) + \gamma_{\text{сп}} \delta_{\text{сп}} \Psi_{\text{п}} (T|_{v=0} - T_c), \quad (10)$$

$$U_{\text{в}} \Big|_{v=0} = \frac{P_c \Psi_{\Gamma} \mu_{\text{в}}}{RT \Big|_{v=0}} - U_{\text{п}} \Big|_{v=0} \frac{\mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{п}}}. \quad (11)$$

Выражение (10) представляет собой уравнение сохранения массы пара, полученное с учетом условий вхождения тела в равновесное состояние: при  $t \rightarrow \infty$ , величины  $\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{пс}}$ ,  $T = T_c$ .

На втором этапе сушки условия тепло- и массообмена на внешней границе тела для уравнений энергии (4) и переноса массы жидкости (5) записываются следующим образом:

$$T|_{v=0} = T^*, \quad U_{\text{ж}} \Big|_{v=0} = 0. \quad (12)$$

Если первое из условий (12) обеспечивается путем изменения  $T_c$ , то из уравнения баланса энергии для граничной поверхности вытекает, что

$$T_c = T \Big|_{v=0} + \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial v} \Big|_{v=0} + L I \right] / \alpha. \quad (13)$$

Здесь  $I$  определяется по выражению (2) с учетом второго из условий (12).

Уравнения (4)-(7) решались численным методом [4], базирующимся на явной трехслойной пересчетной разностной схеме и процедуре расщепления алгоритма по физическим факторам. На основе данной математической модели и численного метода ее реализации разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать изменение во времени температуры сушильного агента. На его основе проводился расчет динамики и кинетики сушки слоя столовой свеклы толщиной  $H$ , симметрично обдуваемого горячим воздухом с начальной температурой  $T_c^0$ , для различных исходных параметров.

### Обсуждение результатов

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты расчета (кривые 1, 1' и 1'') и экспериментальные данные (точки) изменения температуры теплоносителя  $T_c$ , температуры на поверхности  $T_{\Gamma}$  слоя столовой свеклы и его среднего влагосодержания  $\omega_{\text{ср}}$ , при проведении сушки согласно предложенному способу.

Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с расчетными данными. Отклонение температуры на поверхности слоя свеклы на втором этапе сушки от предельно допустимой  $T^*$  не превышало 2 °С. Таким образом качество продукта отвечает нормативным требованиям. Расхождения в расчетных и измеренных значениях температуры сушильного агента не превышают 3 °С. Это свидетельствует о том, что управление процессом сушки рассматриваемого слоя свеклы может проводиться с использованием представленной на рис. 1. зависимости  $T_c = T(t)$ . Организация процесса сушки по изложенному способу позволяет существенно сократить время сушки, о чем свидетельствуют расчетные графики изменения  $T_{\Gamma}$  и  $\omega_{\text{ср}}$  слоя свеклы, обезвоживание

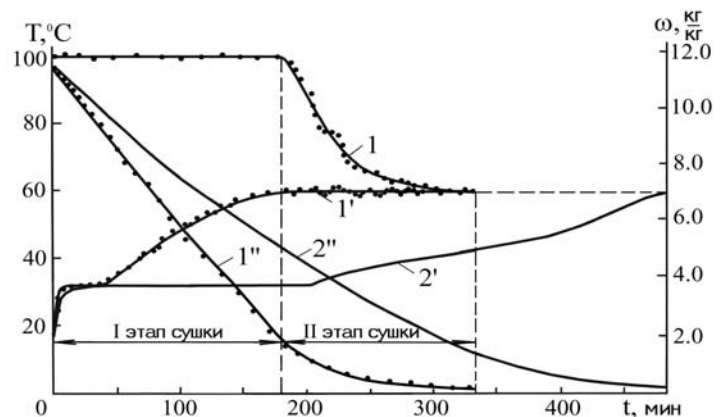
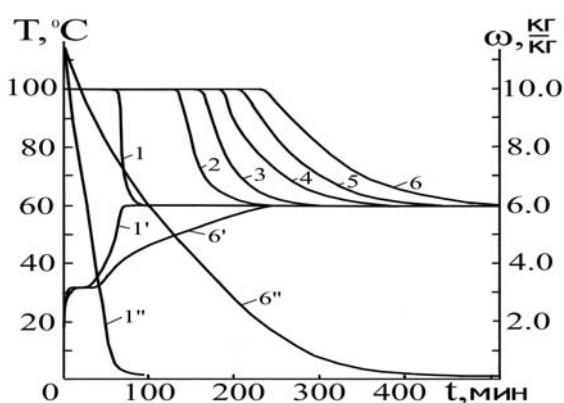


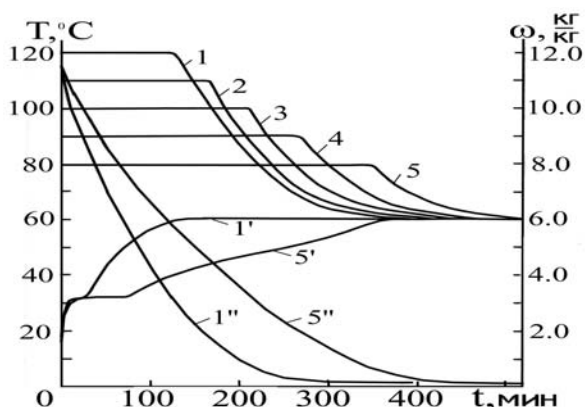
Рис. 1. Изменения во времени температуры сушильного агента  $T_c$  (1), температуры на внешней поверхности слоя свеклы  $T_{\Gamma}$  (1', 2') и среднего влагосодержания  $\omega_{\text{ср}}$  (1'', 2'') для случаев, когда  $T_c^0 = 100$  °С (— - расчетные данные, • - эксперимент) и  $T_c = 60$  °С. Толщина слоя  $H = 12,5$  мм; влагосодержание и скорость теплоносителя  $d_c = 9,6$  г/кг с.в.,  $w_c = 1$  м/с;  $T^* = 60$  °С.

которого осуществляется теплоносителем с постоянной температурой  $T_c = 60\text{ }^\circ\text{C}$  (кривые 2', 2''). Уменьшение времени сушки, как правило, позволяет снизить энергозатраты на ее проведение.

На продолжительность первого и второго этапов сушки существенно влияют исходные параметры термолабильного материала и сушильного агента. На рис. 2, 3 представлены расчетные кривые изменения температур  $T_c$ ,  $T_t$  и среднего влагосодержания  $\omega_{cp}$  во времени при сушке слоя столовой свеклы для различных значений толщины



**Рис. 2.** Графики изменения  $T_c$  (1-6),  $T_t$  (1', 6') и  $\omega_{cp}$  (1'', 6'') при  $T_c^0 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d_c = 9.6\text{ г/кг с.в.}$ ,  $w_c = 1\text{ м/с}$  и  $T^* = 60\text{ }^\circ\text{C}$  для различных значений толщины пластины: 1, 1', 1'' —  $H = 5\text{ мм}$ ; 2, 2' —  $H = 10\text{ мм}$ ; 3, 3' —  $H = 12\text{ мм}$ ; 4, 4' —  $H = 14\text{ мм}$ ; 5, 5' —  $H = 16\text{ мм}$ ; 6, 6', 6'' —  $H = 18\text{ мм}$ .



**Рис. 3.** Графики изменения  $T_c$  (1-5),  $T_t$  (1', 5') и  $\omega_{cp}$  (1'', 5'') при сушке слоя свеклы толщиной  $H = 16\text{ мм}$  для различных значений начальной температуры сушильного агента  $T_c^0$ .  
 $d_c = 9.6\text{ г/кг с.в.}$ ,  $w_c = 1\text{ м/с}$ ;  $T^* = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .

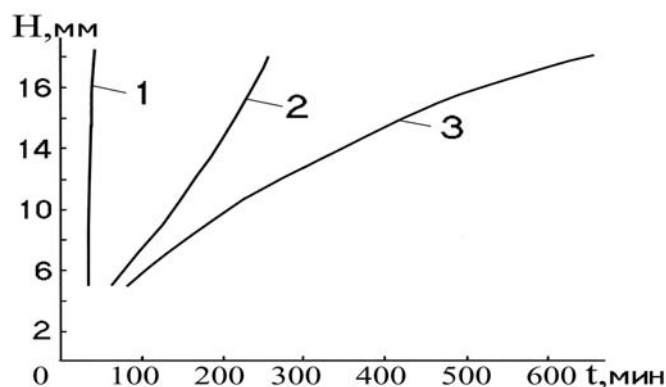
слоя  $H$  и начальной температуры сушильного агента  $T_c^0$ . Увеличение толщины слоя материала замедляет его прогрев, и следовательно интенсивность обезвоживания. Время достижения равновесного влагосодержания  $\omega_p$  для слоя свеклы толщиной 16 мм почти в 5 раз превышает время достижения  $\omega_p$  для слоя 5 мм. Повышение температуры сушильного агента приводит к сокращению времени сушки. Выбор оптимального значения  $T_c^0$  необходимо проводить с учетом общего энергопотребления конкретной сушильной установки.

На рис. 4, 5 приводятся зависимости времени окончания первого периода, а также первого и второго этапов для представленного способа сушки от толщины слоя столовой свеклы и начальной температуры сушильного агента.

### Выводы

Излагается способ сушки термолабильных материалов, разработанный на основе результатов математического моделирования динамики и кинетики процессов теплопереноса, фазовых превращений и усадки при сушке коллоидных капиллярно-пористых тел, который позволяет свети к минимуму время сушки, сокращая при этом затраты энергии на ее проведение.

Разработан программный комплекс, позволяющий определять необходимую для управления процессом сушки зависимость  $T_c = T(t)$  для различных параметров материала и теплоносителя. На его базе исследовано влияние геометрических



**Рис. 4.** Зависимости времени окончания периода постоянной скорости сушки (кривая 1), первого (кривая 2) и второго (кривая 3) этапов сушки от толщины слоя столовой свеклы.  $T_c^0 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  
 $d_c = 9.6\text{ г/кг с.в.}$ ,  $w_c = 1\text{ м/с}$ ,  $T^* = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .

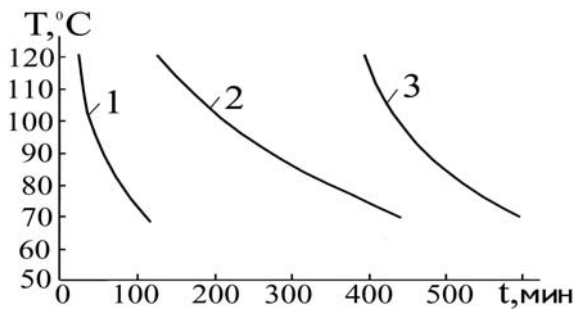


Рис. 5. Зависимости времени окончания периода постоянной скорости сушки (кривая 1), первого (кривая 2) и второго (кривая 3) этапов сушки от начальной температуры сушильного агента.  $d_c = 9.6$  г/кг с.в.,  $w_c = 1$  м/с,  $T^* = 60$  °C,  $H = 16$  мм.

параметров материала и начальной температуры сушильного агента на динамику и кинетику сушки слоя столовой свеклы.

Приводятся графики  $T_c = T(t)$  для некоторых значений толщин слоя свеклы и начальной температуры теплоносителя, которые могут быть использованы для управления процессом сушки в соответствии с предложенным способом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский В.Р., Чавдаров А.С., Снежкин Ю.Ф. и др. Способ сушки фруктовой выжимки. А.с. СССР № 762840, МКВ<sup>3</sup> А 23 В 7/02, 1980.
2. Алханашивили Н.А., Зауташивили Д.И., Чликадзе А.М. и др. Способ сушки нарезанных баклажан. А.с. СССР № 982638, МКВ<sup>3</sup> А 23 В 7/02, 1982.
3. Деклараційний патент на винахід 62665А України А 23 В 7/02 Спосіб сушіння термолабільних матеріалів/ Нікітенко М.І., Снежкін Ю.Ф., Сорокова Н.М.- № 2003043816; Заявлено 24.04.2003; Опубл. 15.12.2003; Бюл. № 12.
4. Нікітенко Н.І., Снежкін Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Динамика процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при обезвоживании коллоидных капиллярно-пористых материалов// Пром. теплотехника. 2003.- Т. 25.- № 3.- С.56-66.
5. Нікітенко Н.І. Теория тепломассопереноса. Киев: Наук. думка, 1983.-352 с.
6. Нікітенко Н.І. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах// Инж.-физ. журн.- 2000.- Т. 73.- № 4.- С. 851-860.

Получено 19.10.2004 г.