

УДК 664.8.047.1

Профессор А.А. Шевцов, аспирант И.В. Мажулина
(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра технологии хранения и
переработки зерна, тел. (473) 255-65-11

Выбор оптимальной загрузки сублиматора по величине удельных энергозатрат при вакуум-сублимационной сушке ферментного препарата инулиназы

Изложена техника и методика эксперимента по изучению кинетических закономерностей периодического процесса вакуум-сублимационной сушки ферментного препарата инулиназы, и предложен алгоритм выбора оптимальной загрузки сублиматора по минимальной величине удельных энергозатрат.

The technics and a technique of experiment on studying kinetic laws of periodic process vacuum and freeze-drying of a fermental preparation inulinase is stated and the algorithm of a choice of optimum loading sublimator on the minimum size of specific power inputs is offered.

Ключевые слова: ферментный препарат, инулиназа, вакуум-сублимационная сушка, удельные энергозатраты, оптимизация.

Наиболее качественный метод обезвоживания продуктов - сублимационная сушка из замороженного состояния в вакууме, при которой в полной мере сохраняются исходные свойства высушиваемого материала: запах, вкус, цвет, количественный состав, объем. Так как в большинстве случаев ферментные препараты чрезвычайно чувствительны к действию повышенных температур, вакуум-сублимационная сушка является одним из наиболее приемлемых методов для их обезвоживания [1, 2].

Несмотря на неоспоримые преимущества перед другими методами обезвоживания, вакуум-сублимационная сушка имеет ряд недостатков: большая длительность и энергоемкость процесса, немалые капитальные затраты на оборудование и сложность обеспечения сушки из-за наличия вакуума. Поэтому выбор оптимальных режимов, обеспечивающих сокращение его продолжительности, снижение энергетических и капитальных затрат, весьма актуален [5].

Объектом сушки являлся ферментный препарат инулиназы, полученный глубинным способом с использованием высокоэффективного продуцента микромицета *Aspergillus awamori* 2250 [3].

Инулиназа – это фермент, гидролизующий инулин в топинамбуре, топинамбуровом, одуванчике и цикории до фруктозы. Фруктоза в 1,73 раза слаще сахарозы, она менее кариогенна, и в этой связи находит все большее применение как сахаросодержащий компонент в диабетическом питании [3].

На большинстве предприятий микробиологической и пищевой промышленности применяется сублимационное высушивание продуктов на противнях в установках периодического действия.

Экспериментальные исследования процесса вакуум-сублимационной сушки ферментного препарата проводились в установке, оснащенной необходимыми контрольно-измерительными приборами (рис. 1).

Установка состоит из герметичной сублимационной камеры 1 с крышкой 2, снабженной смотровыми стеклами. Внутри камеры расположен десублиматор 3 в виде трубчатого змеевика, по которому циркулирует хладагент «Хладон-22». Десублиматор отделен от сушильной камеры экраном 4, выполненным из тонколистовой полированной нержавеющей стали. Рабочий вакуум в сублиматоре создавался двухступенчатым ротационным вакуум-насосом 5, а охлаждение десублиматора осуществлялось двухступенчатым фреоновым компрессорно-охладительным агрегатом 6.

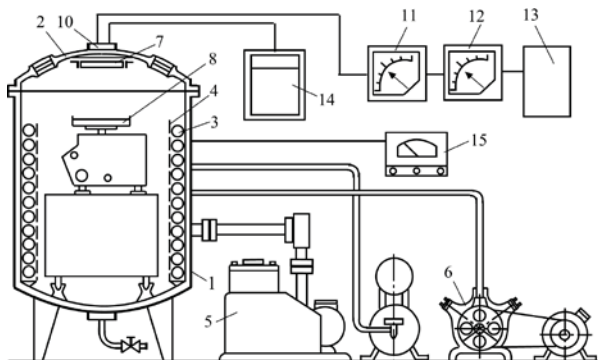


Рис. 1. Сублимационная сушилка периодического действия: 1 - камера; 2 - крышка сублиматора; 3 - десублиматор; 4 - экран; 5 - вакуум-насос; 6 - холодильный агрегат; 7 - кварцевая лампа; 8 - весы; 9 - противень с продуктом; 10 - герметичный разъем; 11 - амперметр; 12 - вольтметр; 13 - автотрансформатор; 14 - потенциометр; 15 - вакуумметр

Для проведения исследований процесса сушки препаратов под действием радиационного подвода тепла в верхней части крышки сублиматора 2 на кронштейне закреплена кварцевая галогеновая лампа 7, служащая источником инфракрасного излучения. Для регистрации убыли массы продукта в процессе сушки внутри камеры на специальной подставке размещены квадрантные весы 8, на чашку которых устанавливали противень с продуктом 9. Регистрацию массы по шкале весов производили визуально через смотровое стекло в крышке 2. Напряжение на лампе 7 регулировали автотрансформатором 13, а потребляемую при этом мощность устанавливали по амперметру 11 и вольтметру 12 класса точности 1,0.

Значения температуры десублиматора, глубины и поверхности продукта фиксировали с помощью миниатюрных хромель-копелевых термопар, подключенных через герметичный разъем 10 к потенциометру 14. Остаточное давление в камере сушилки контролировали термоэлектрическим вакуумметром 15.

Для определения исходного содержания сухих веществ в растворах ферментов использовали рефрактометр. Влажность сухих ферментов определяли путем высушивания до постоянной массы в вакуумной сушилке SPT-200 при температуре 313...315 К и остаточном давлении 2,5...2,8 кПа.

Кинетику сушки препарата инулиназы исследовали методом «экстремальных температур». Поскольку нагрев фермента выше 305,5 К нежелателен по условиям термочув-

ствительности, то в качестве верхней экстремальной температуры продукта принято значение 305 К (+32 °С).

Фермент с различной концентрацией сухих веществ замораживали в алюминиевых чашках диаметром $9 \cdot 10^{-2}$ м и высотой $2 \cdot 10^{-2}$ м в камере низкотемпературного холодильного стола при 233 К (-40 °С). Высота слоя во всех опытах составляла $9 \cdot 10^{-3}$ м, а режимные параметры работы установки поддерживались на одинаковом уровне. Температуру и показания весов измеряли через каждые 2 мин.

Все кривые сушки инулиназы имели период постоянной скорости сушки, при котором к препарату подводилось максимальное количество тепла (рис. 2).

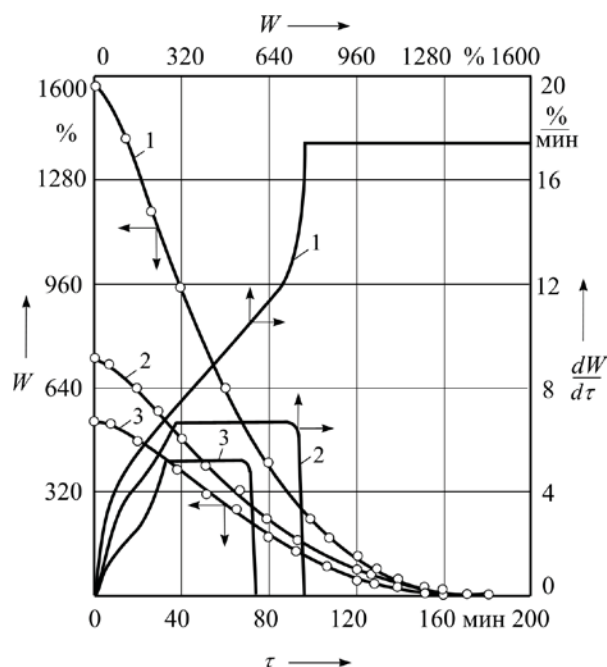


Рис. 2. Кривые сушки и скорости сушки инулиназы с исходной концентрацией сухих веществ C_c , %: 1 - 6; 2 - 12; 3 - 15; $h = 9 \cdot 10^{-3}$ м

Снижение мощности энергоподвода приводило к резкому падению скорости сушки. Длительность периода постоянного энергоподвода во всех случаях примерно одинакова. Некоторое ее снижение для препарата с низкой концентрацией сухих веществ можно объяснить разницей в глубине вмороженной термопары на поверхности продукта и увеличением коэффициента температуропроводности с повышением влажности.

Кривые скорости сушки в периоде ее убывания имели различную кривизну. Точка перегиба (вторая критическая влажность $W_{к2}$) соответствовала по времени началу периода вакуу-

ной досушки, т. е. к этому моменту практически вся вымороженная влага сублимирована и начиналось удаление связанной (невымороженной) влаги. Продолжительность периода вакуумной досушки для различных концентраций сухих веществ в растворе фермента различалась незначительно. Некоторое увеличение его длительности для более влажного препарата объяснялось ухудшением подвода тепла к высушиваемому материалу в связи с тем, что при увеличении пористости сухого слоя снижался коэффициент теплопроводности.

При сублимационной сушке на противнях важнейшим параметром, влияющим на продолжительность обезвоживания, является высота слоя продукта [1, 4].

Для определения ее влияния на продолжительность сублимационной сушки и построения кинетической модели использовали метод управления процессом по экстремальным температурам [1].

На рис. 3 представлены термограммы процесса сушки раствора инулиназы с исходным содержанием сухих веществ 6 % и высотой слоя $h = 9 \cdot 10^{-3}$ м и график энергоподвода от «светлого» излучателя - кварцевой галогеновой лампы.

Процесс сушки разбивался на три периода: τ_1 - постоянного энергоподвода; τ_2 - убывающего энергоподвода и τ_3 - вакуумной досушки.

В периоде постоянного энергоподвода мощность нагревателя максимальна, а температура поверхностного слоя постепенно увеличивалась, достигая в конце периода верхней допустимой температуры нагрева ($t_{\text{доп}}$).

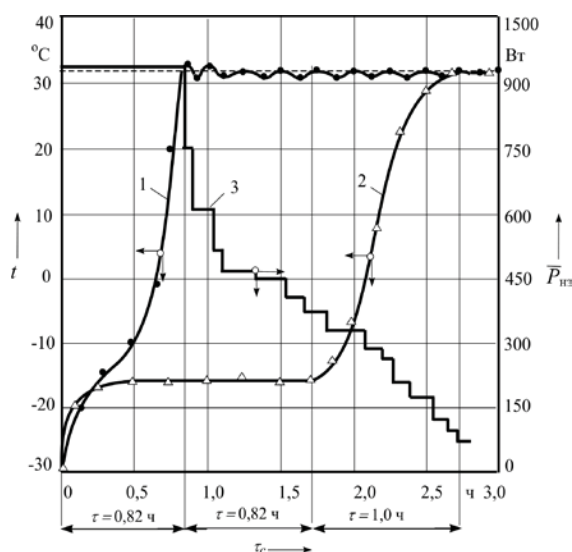


Рис. 3. Термограммы (1,2) и график энергоподвода (3) при сублимационной сушке с ИК-нагревом: $c = 6\%$; $h = 9 \cdot 10^{-3}$ м; 1 - поверхностный слой; 2 - середина слоя

В периоде снижающегося энергоподвода происходила сублимация замороженной влаги и постепенное углубление зоны сублимации в толщу продукта.

Период вакуумной досушки характеризовался повышением температуры глубинного слоя, в котором нижняя и верхняя поверхности фазового перехода встречаются и начинается испарение невымороженной влаги из продукта.

При обработке экспериментальных данных процесса сублимационной сушки препарата инулиназы при теплоподводе от «светлого» излучателя получено следующее уравнение:

$$\tau_k = 157923,6h^2 - 236,6h + 0,817, \quad (1)$$

где h - высота слоя продукта на противне, м.

Экспериментальная проверка уравнения (1) показала удовлетворительную сходимость результатов сравнения, максимальная ошибка которых не превышала 6,5 %.

В большинстве промышленных вакуум-сублимационных установок сушка продукта осуществляется на кассетах с греющими плитами, на которых устанавливаются противни с продуктом и реализуется комбинированный радиационно-кондуктивный энергоподвод от «темных» низкотемпературных излучателей. К такому классу установок относится сублимационная сушилка KS-30, применяемая на большинстве предприятий микробиологической промышленности.

При обработке экспериментальных данных получено уравнение для энергоподвода от «темных» излучателей:

$$\tau_k = 354630h^2 - 793,3h + 3,498. \quad (2)$$

Экспериментальная проверка уравнения (2) показала хорошую сходимость результатов сравнения, максимальная ошибка которых не превышала 7 %.

При выборе оптимальной загрузки сублиматора в качестве критерия оптимизации использовался технико-экономический показатель - суммарные затраты электроэнергии, приходящиеся на единицу массы загружаемого продукта,

$$R = Z_1 + Z_2 + Z_3 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Z_1 , Z_2 , Z_3 - удельные затраты электроэнергии на подогрев продукта, привод холодильного компрессора десублиматора, привод ваку-

ум-насоса на единицу загружаемого продукта, р /кг;

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{\Pi_{\partial} \overline{P}_H}{G} \tau_k, \\ z_2 &= \frac{\Pi_{\partial} \overline{P}_{\text{ЛК}}}{G} \tau_k, \\ z_3 &= \frac{\Pi_{\partial} \overline{P}_{\text{ВН}}}{G} \tau_k. \end{aligned} \quad (4)$$

По данным экспериментальных исследований процесса сушки, осуществляемого по методу экстремальных температур, получена зависимость высоты слоя продукта от количества загружаемого материала:

$$\tau_k = AG^2 + BG + C = (7,187 \cdot 10^{-3}) G^2 + (-5,047 \cdot 10^{-2}) G + 0,824. \quad (5)$$

Для определения составляющей (4) критерия (3) используем расчетные характеристики энергоподвода при программированном по времени режиме управления.

Интенсивность теплового потока представлена через мощность греющих плит:

$$P_H^{\max} = k_p q_{\max} F_H = k_p F_H \frac{\overline{\lambda}_c (t_{\text{доп}} - t_s)}{h_1}, \quad (6)$$

$$P_2 = k_p q_{2\text{opt}} F_H = k_p F_H \frac{\overline{\lambda}_c (t_{\text{доп}} - t_s)}{\sqrt{h_1^2 + \frac{\tau - \tau_1}{A_2}}}, \quad (7)$$

где $P_H^{\max}$ - максимальная мощность ТЭНов, установленных в плитах, кВт; F_H - суммарная поверхность нагрева, м²; $k_p = \eta_{\text{пот}} + 1/\eta$ - коэффициент мощности, учитывающий коэффициент перевода электрической энергии в тепловую $\eta = 0,24$ и коэффициент потерь теплового потока $\eta_{\text{пот}} = 0,07-0,12$; P_2 - текущее значение мощности греющих плит во втором периоде сушки, кВт.

После интегрирования (5) по времени определена средняя мощность нагревательных элементов греющих плит:

$$\begin{aligned} \int_{\tau_1}^{\tau_k} P_2 d\tau &= \int_{\tau_1}^{\tau_k} k_p F_H q_{2\text{opt}} d\tau = k_p F_H \overline{\lambda}_c (t_{\text{доп}} - t_s) \int_{\tau_1}^{\tau_k} \frac{d\tau}{\sqrt{h_1^2 + \frac{\tau - \tau_1}{A_2}}} = \\ &= 2k_p F_H \overline{\lambda}_c (t_{\text{доп}} - t_s) \int_{\tau_1}^{\tau_k} \frac{d\tau}{\sqrt{A_2 h_1^2 + \tau_k - \tau_1}} = \\ &= 2k_p F_H \overline{\lambda}_c (t_{\text{доп}} - t_s) \sqrt{A_2} \left(\sqrt{A_2 h_1^2 + \tau_k - \tau_1} - \sqrt{A_2 h_1^2 + \tau_1 - \tau_k} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Окончательно получено

$$\overline{P}_2 (\tau_k - \tau_1) = 2k_p F_H \overline{\lambda}_c (t_{\text{доп}} - t_s) [\sqrt{A_2 (A_2 h_1^2 + \tau_k - \tau_1)} - A_2 h_1].$$

Уравнение (8) позволяет определить среднюю мощность источников теплоподвода во втором периоде сушки. Расчет по (7) зачастую весьма затруднителен из-за необходимости получения расчетным или экспериментальным путем значений λ_c и коэффициента k_p , поэтому комплекс $k_p F_H \overline{\lambda}_c (t_{\text{доп}} - t_s)$ найден из (6), поскольку значение $P_H^{\max}$ обычно известно из технической характеристики установки:

$$k_p F_H \overline{\lambda}_c (t_{\text{доп}} - t_s) = P_H^{\max} h_1. \quad (9)$$

С учетом (5) и (9) получена зависимость средней мощности нагрева от количества загружаемого в сублиматор продукта:

$$\overline{P}_i = \frac{P_i^{\max} \tau_1 + 2P_i^{\max} h_1 [\sqrt{A_2 (A_2 h_1^2 + \tau_k - \tau_1)} - A_2 h_1]}{AG^2 + BG + C}. \quad (10)$$

Зависимость (10) (рис. 4, кривая 1), хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при помощи счетчиков потребляемой электроэнергии.

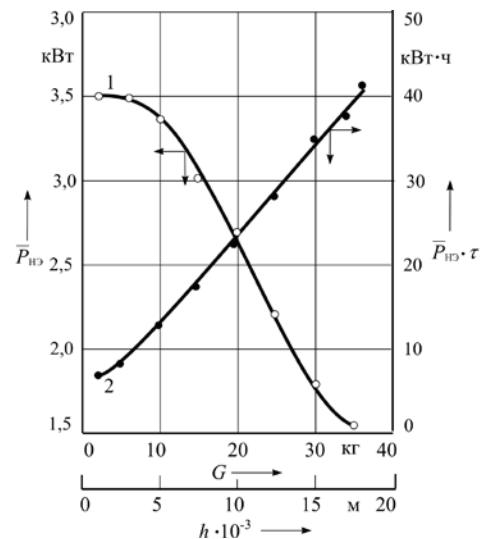


Рис. 4. Зависимость средней мощности теплоподвода (1) и потребляемой электроэнергии (2) от загрузки сублиматора

Кривая 2 (рис. 4) аппроксимирована уравнением линейной регрессии вида

$$\overline{P_H} \tau_k = k_1 G + c_1 = 0,759G + 1,268. \quad (11)$$

Подставляя (12) в (4), получим

$$\mathcal{Z}_1 = \frac{\Pi_2}{G} (k_1 G + c_1).$$

Установлено, что средняя мощность, потребляемая приводами компрессора и вакуум-насоса, практически не зависит от количества загружаемого материала G и соответствует номинальной мощности электродвигателей: $P_{BH} = 1,5$ кВт; $P_{XK} = 4,0$ кВт.

С учетом полученных результатов выражение (3) приведено к виду

$$R = \frac{\Pi_2}{G} [A(\overline{P_{XK}} + \overline{P_{BH}})G^2 + (k_1 + B(\overline{P_{XK}} + \overline{P_{BH}}))G + c_1 + C(\overline{P_{XK}} + \overline{P_{BH}})]. \quad (12)$$

Для удобства исследования (11) на экстремум введены обозначения:

$$a = \Pi_2 A(\overline{P_{XK}} + \overline{P_{BH}}) = 7,905 \cdot 10^{-4};$$

$$b = \Pi_2 [k_1 + B(\overline{P_{XK}} + \overline{P_{BH}})] = 9,628 \cdot 10^{-3};$$

$$c = \Pi_2 [c_1 + C(\overline{P_{XK}} + \overline{P_{BH}})] = 1,159 \cdot 10^{-1}.$$

Тогда

$$R = \frac{aG^2 + bG + c}{G} \rightarrow \min. \quad (13)$$

Из условия существования экстремума

$$\frac{dR}{dG} = \frac{aG^2 - c}{G^2} = 0. \quad (14)$$

Отсюда найдено единственное решение в точке оптимума, т. е.

$$aG^2 - c = 0 \Rightarrow G = \sqrt{c/a}. \quad (15)$$

Так как $\frac{d^2 R}{dG^2} = \frac{2cG}{G^4} > 0$, в точке оптимума

(15) имеет место минимум.

Таким образом, обоснована экстремальная характеристика процесса сублимационной сушки ферментного препарата инулиназы, которая позволяет осуществлять выбор оптимальной загрузки сублиматора при минимуме энергозатрат. На рис. 5 (кривая 1) построен график зависимости (13), из которого следует, что минимум энергозатрат наблюдается при загрузке 12,1 кг фермента и распределении его на противнях равномерным слоем высотой $2h = 5,2 \cdot 10^{-3}$ м.

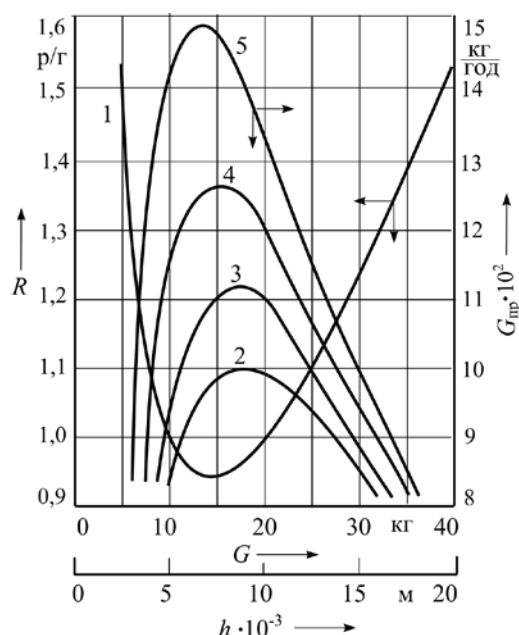


Рис. 5. Расчетные зависимости стоимости энергозатрат на единицу массы высушенного продукта (1) и годовой производительности по сухому продукту (2-5) от загрузки сублиматора при различных значениях времени вспомогательных операций $\tau_{во}$, ч: 2 - 0,5; 3 - 1,5; 4 - 2,0; 5 - 3,0

Для более полного анализа технико-экономических показателей при эксплуатации сушилки рассмотрено влияние величины загрузки сублиматора на производительность за смену. При этом учтено время вспомогательных операций (загрузка продукта, нарушение вакуума, разгрузка, оттайка десублиматора и т. д.). В этом случае производительность установки определяли следующим образом:

$$G_{пр} = T_{см} \frac{G}{\tau_k + \tau_{во}}, \quad (16)$$

где $T_{см}$ - продолжительность смены, ч; $\tau_{во}$ - продолжительность выполнения вспомогательных операций, ч.

Подставим (5) в (16):

$$G_{пр} = T_{см} \frac{G}{AG^2 + BG + C + \tau_{во}} \rightarrow \max. \quad (17)$$

Функция (17) имеет единственный максимум:

$$\frac{dG_{пр}}{dG} = T_{см} \frac{-AG^2 + C + \tau_{во}}{(\tau_k + \tau_{во})^2} = 0 \Rightarrow G_{пр}^* = \sqrt{\frac{C + \tau_{во}}{A}}.$$

На рис. 5 показаны кривые, построенные по формуле (14) для различных значений $\tau_{\text{во}}$. Перемножив (9) и (12), получаем затраты электроэнергии в стоимостном выражении за одну смену:

$$R_{\text{см}} = G_{\text{пр}} R = T_{\text{см}} \frac{aG^2 + bG + c}{AG^2 + BG + C + \tau_{\text{во}}}.$$

Кривые на рис. 5 отражают изменение энергозатрат за год в зависимости от загрузки сушилки и времени выполнения вспомогательных операций. На основании этого графика рассчитываются годовые энергозатраты, а также годовая экономия электроэнергии в процессе сублимационной сушки.

Таким образом, предложен алгоритм выбора оптимальной загрузки сублиматора по минимальной величине удельных энергозатрат в процессе сушки ферментного препарата инулиназы в вакуум-сублимационных сушилках периодического действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камовников, Б. П. Вакуум-сублимационная сушка пищевых продуктов [Текст] / Б. П. Камовников, Л. С. Малков, В. А. Воскобойников. -М.: Агропромиздат, 1985. – 288 с.
2. Антипов, С. Т. Моделирование процессов вакуум-сублимационной сушки материалов с развитой поверхностью тепло- и массообмена и с различными источниками энергоподвода [Текст] / С. Т. Антипов, А. И. Шашкин, С. В. Шахов, В. Б. Черных, Т. И. Некрылова.-Воронеж: гос. технол. акад. Воронеж; 2011. – 168 с.
3. Жеребцов, Н. А. О механизме расщепления β -2,1-фруктозных связей в инулине инулазой *Aspergillus awamori* 2250 [Текст] / Н. А. Жеребцов, О. С. Корнеева, Т. Н. Тертычная // Биохимия. – 1995. –Т. 60. Вып. 10. – С. 1580-1588.
4. Шевцов, А. А. Методология выбора оптимальных решений сублимационной сушки ферментного препарата инулазы *Aspergillus awamori* 2250 [Текст] / А. А. Шевцов, И.В. Мажулина // материалы Междунар. науч.-техн. интернет-конф. «Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах». - Воронеж, 2011. – С. 230-234.
5. Шахов, С.В. Анализ проблем математического моделирования процессов вакуум-сублимационной сушки [Текст] / С.В. Шахов // вестник ВГТА. -2005. - № 6.