УДК 664.785.8

Профессор А.Н. Остриков

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств. тел. (473) 255-38-87

старший научный сотрудник С.А. Шевцов

(Воронеж. инст. ГПС МЧС России) тел. (473) 277-86-53

доцент С.В. Куцов

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств. тел. (473) 255-38-51

Professor A.N. Ostrikov

(Voronezh state university of engineering technologies) Department of technology of fats, of the processes and devices of chemical and food industries. phone (473) 255-38-87

senior researcher S.A. Shevtsov

(Voronezh institute of the state fire emergency service of Russian Ministry of emergency situations) phone (473)-277-86-53

associate Professor S.V. Kutsov

(Voronezh state university of engineering technologies) Department of technology of bread-making, confectionery, macaroni and grain processing industries. phone (473) 255-38-51

Исследование кинетики процесса сушки пищевого растительного сырья при активных гидродинамических режимах и разработка методики инженерного расчета сушилки

The study of the kinetics of drying food raw material of plant origin in the active hydrodynamic regimes and development of dryer engineering calculation methods

Реферат. Потребительские свойства пищевого растительного сырья формируются в процессе термической обработки. Новые физические, вкусовые и ароматические свойства продуктов растительного происхождения, образующиеся при сушке, обусловлены существенными изменениями состава сырья, происходящими в результате биохимических реакций. При производстве сушеных и обжаренных продуктов очень важно соблюдать параметры, которые способствуют прохождению биохимических процессов, направленных на создание продукта с высокими пищевыми достоинствами, сильным ароматом и приятным вкусом. В работе исследованы основные кинетические закономерности процесса сушки пищевого растительного сырья (на примере топинамбура) в плотном пересыпающемся слое, которые были положены в основу выбора рационального режима термообработки с учетом изменения влагосодержания продукта. Установлен характер влияния гидродинамического режима перемещения высушиваемого продукта на высоту слоя и интенсивность сушки. В результате анализа кинетических закономерностей процесса сушки пищевого растительного сырья (на примере топинамбура) подобраны ступенчатые режимы сушки. Анализ кривых интенсивности сушки частиц топинамбура воздухом, паровоздушной смесью и перегретым паром показал наличие двух участков: горизонтального и постепенно убывающего. Кинетические закономерности процесса сушки топинамбура в плотном пересыпающемся слое были положены в основу методики инженерного расчета сушилки с транспортирующим органом в виде «бегущей волны». Использование сушилки с транспортирующим органом в виде «бегущей волны» для сушки пищевого растительного сырья позволит добиться равномерной сушки продукта вследствие использования мягких, щадящих режимов пересыпания при максимальном сохранении частиц обрабатываемого продукта; повысить качества готового продукта за счет использования пересыпающегося слоя, снижающего комкование высушиваемого продукта.

Summary. Consumer properties of food raw material formed during the heat treatment. New physical, flavoring and aromatic properties of the products of plant origin, formed during drying due to substantial changes in the composition of the raw material occurring as a result of biochemical reactions. In the production of dried and roasted products is very important to follow the parameters that contribute to the passage of biochemical processes aimed at creating a product with high nutritional qualities, strong aroma and pleasant taste. We studied the basic kinetics of the drying process of food raw material (in terms of artichoke) in a dense interspersed layer, which formed the basis for the rational choice of the drying regime with due consideration of changes in the moisture content of the product are studied. The nature of the effect of the dried product movement hydrodynamic conditions on a layer height and intensity of drying is established. As a result of food raw material drying process kinetics analysis (in terms of artichoke) multistep drying regimes were chosen. Analysis of the artichoke particles drying by air, air-steam mixture and superheated steam intensity showed the presence of two parts: the horizontal one and gradually diminishing one. Kinetic laws of the artichoke drying process in a dense interspersed layer were the basis of engineering calculation of dryer with a transporting body in the form of a "traveling wave". Application of the dryer with the transporting body in the form of a "traveling wave" for food raw material drying allow to achieve uniform drying of the product due to the use of soft, gentle regimes of oversleeping while preserving to the utmost particles of the product; to improve the quality of the finished product through the use of interspersed layer that reduces clumping of product to be dried.

Ключевые слова: сушка, пищевое растительное сырье, инженерный расчет, сушилка.

Keywords: drying, food raw material, engineering calculation, dryer.

© Остриков А.Н., Шевцов С.А., Куцов С.В., 2015

Потребительские свойства сушеного растительного сырья (топинамбура, белых корне- ньев, шиповника, боярышника, картофеля, свеклы, моркови, крупы и др.) (его специфиче- ский вкус и аромат) формируются в процессе термообработки [1, 2]. Новые физические, ароматические и вкусовые свойства топинам- бура, которые образуются при сушке, обу- словлены значительными изменениями хими- ческого состава, происходящими в результате биохимических реакций. При производстве продуктов с применением сушки и обжарки очень важно соблюдать параметры, которые активизируют прохождение биохимических процессов, направленных на создание каче- ственного продукта с высокими пищевыми достоинствами, приятным вкусом и ароматом.

Традиционная конвективная сушка пи- щевого растительного сырья сопряжена с не- высоким качеством готового продукта и зна- чительными энергозатратами [2]. Поэтому необходима разработка новых сушильных и обжарочных установок с комбинированными гидродинамическими режимами. Создание такого высокоэффективного оборудования, обеспечивающего полную механизацию и ав- томатизацию технологических процессов, поз- волит изготовить поточно-механизированные линии, обеспечивающие значительное повы- шение производительности труда, улучшение качества пищевого растительного сырья и его безотходную переработку.

Целью данной работы является научное обеспечение процесса сушки пищевого расти- тельного сырья при комбинированных гидро- динамических режимах; повышение эффек- тивности термообработки за счет создания но- вого способа сушки и оборудования для его реализации, обеспечивающего требуемое ка- честве готовой продукции и экономии тепло- энергетических ресурсов.

Процесс сушки пищевого растительно- го сырья (топинамбура, белых корне- ньев, шиповника, боярышника, картофеля, свеклы, моркови и др.) паром при атмосферном давле- нии исследовали в следующих диапазонах из- менения параметров: температура перегретого пара 413–423 К; температура воздуха 333–363 К; скорость потока теплоносителя на вхо- де в слой – 0,8–8,0 м/с; удельная нагрузка про- дукта на решетку – 15–30 кг/м². В качестве объекта исследования использовали шипов- ник, боярышник, топинамбур, белые корни, картофель, свеклу, морковь и др., которые предварительно очищали, мыли и разрезали на кубики с размером сторон от 6 до 8 мм. В ка- честве теплоносителя использовали перегре-

тый пар атмосферного давления, нагретый воздух и паровоздушную смесь.

В результате совместного анализа кине- тических закономерностей процесса сушки то- пинамбура при стационарных режимах и форм связи влаги в продуктах, определенных диффе- ренциально-термическим методом, подобрали ступенчатые режимы сушки (рисунок 1).

Температура теплоносителя в процессе сушки в течение первых 270 с составляет 408 К, затем в течение 960 с – 413 К и, нако- нец, в течение 480 с – 418 К, а скорость тепло- носителя при сушке в плотном слое в течение первых 1230 с составляет 2,8 м/с, затем в тече- ние 480 с – 1,85 м/с, а при сушке в псевдо- ожиженном слое в течение первых 1230 с – 10,1 м/с, затем в течение 480 с – 8,0 м/с.

Наиболее явно влияние технологических параметров термообработки на кинетику про- цесса можно наблюдать на кривых интенсивно- сти сушки (рисунок 1). Из анализа кривых ин- тенсивности сушки частиц продукта воздухом (рисунок 2, а), паровоздушной смесью (рису- нок 2, б) и перегретым паром (рисунок 2, в) вид- но, что выделяются два отчетливо выраженных участка: горизонтальный и постепенно убываю- щий. После первого значения критического вла- госодержания интенсивность сушки монотонно уменьшается, причем положение точки переги- ба, соответствующей первому критическому влагосодержанию, определялось размером ча- стиц продукта и параметрами процесса сушки (удельной нагрузки продукта на ленту, темпера- туры и скорости теплоносителя и т. п.).

Установлено, что интенсивность сушки и обжарки независимо от вида применяемого теплоносителя (паровоздушная смесь, воздух или перегретый пар) обратно пропорциональна толщине слоя $j \approx h^{1-n}$, где n – показатель степени у числа Рейнольдса Re . Поэтому, чем больше высота слоя в направлении движения потока теплоносителя, тем ниже интенсив- ность сушки и обжарки.

Из кривых на рисунке 1 видно, что с по- вышением температуры возрастает интенсив- ность сушки и первое критическое влагосо- держание. Увеличение температуры воздуха с 60 °С до 90 °С приводило к незначительному возрастанию интенсивности в периоде постоянной скорости сушки.

Повышение влажности воздуха при термо- обработке паровоздушной смесью (рисунок 1, б) резко снижает интенсивность сушки и первое критическое влагосодержание. Например, увели- чение влажности воздуха с 0,57 до 0,86 снижает интенсивность сушки примерно в 1,71 раза. При

низких температурах (около 60 °С) увеличение влажности воздуха мало влияло на интенсивность термообработки в периоде убывающей скорости сушки. Повышение скорости движе-

ния теплоносителя заметно интенсифицирует процесс в периоде постоянной скорости сушки и значительно меньше сказывается в периоде убывающей скорости сушки.

Рисунок 1. Кинетические зависимости процесса сушки кубиков топинамбура при рациональных режимных параметрах: а – диаграмма изменения скорости v_n и температуры T теплоносителя во времени, б – кривая сушки $U = f(\tau)$ (1) и кривая скорости сушки $dU/d\tau = f(U)$ (2) топинамбура

Рисунок 2. Зависимость интенсивности испарения j , кг/(м²·ч), от влагосодержания топинамбура u , кг/кг, а – при температурах воздуха t , °C: 1 – 60; 2 – 70; 3 – 80; 4 – 90; б – при температурах паровоздушной смеси t , °C: 1 – 140; 2 – 150; 3 – 160; 4 – ступенчатый режим (135-140-145); в – при температурах перегретого пара t , °C: 1 – 140; 2 – 150; 3 – 160; 4 – ступенчатый режим (135-140-145)

В результате, были определены основные кинетические закономерности процесса сушки кубиков топинамбура в импульсном псевдоожиженном слое, которые были использованы при разработке методики инженерного расчета сушилки с транспортирующим органом в виде «бегущей волны».

Исходные данные для расчета: вид продукта; начальное влагосодержание u_n , кг/кг; начальная температура $\bar{T}_n$, К; производительность по исходному продукту G_n , кг/ч; температура перегретого пара, поступающего на сушку $\bar{T}_n^H$, К; температура пара, отработанного после суши $\bar{T}_n^K$, К.

С учетом исходных данных и результатов моделирования предложена следующая методика расчета.

Производительность по готовому продукту, кг/ч:

$$G_k = G_n (1 + \bar{u}^K) / (1 + \bar{u}^H), \quad (1)$$

где конечное влагосодержание определяли по формуле:

$$\bar{U}(Fo) = 1 - \frac{1}{\varepsilon Ko} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 D_{ni} (1 - \nu_i^2) \exp(-\mu_n^2 Fo).$$

Массовая доля испаряемой влаги при сушке, кг/ч:

$$\Delta G = G_n - G_k. \quad (2)$$

Удельный расход теплоты, затрачиваемый на испарения 1 кг влаги, Дж/кг:

$$q_{yd} = r + (i_{nk} - i_{nn}) + \gamma_2 (\bar{c}_2 (\bar{T}_{2k} - \bar{T}_{2n}) + \bar{c}_n (\bar{T}_n^H - \bar{T}_n^K)) + \gamma_1 \bar{c}_1 (\bar{T}_K - \bar{T}_n) \quad (3)$$

где r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг; i_{nn} и i_{nk} – энтальпии перегретого пара, соответственно, до и после калорифера, кДж/кг; γ_1 и γ_2 – удельные доли содержания, соответственно, сухих веществ и влаги, доли ед.; $\bar{c}_1$ – средняя теплоемкость сухих веществ между их начальным ($\bar{T}_n$) и конечным ($\bar{T}_K$) состояниями; $\bar{c}_2$ – средняя теплоемкость воды между ее начальным ($\bar{T}_{2n}$) и конечным ($\bar{T}_{2k}$) состояниями; $\bar{c}_3$ – средняя теплоемкость перегретого пара между его начальным ($\bar{T}_n^H$) и конечным ($\bar{T}_n^K$) состояниями.

Конечную температуру продукта определяли по формуле:

$$\bar{T}(Fo) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 D_{ni} \exp(-\mu_n^2 Fo).$$

Общая массовая доля теплоты, расходуемой на испарение влаги, кДж:

$$Q_c = q_{yd} \cdot \Delta G. \quad (4)$$

Расход перегретого пара с учетом 5 % потерь, кг/ч:

$$G_n = \frac{Q_c + 0,05 Q_c}{\bar{c}_n (\bar{T}_n^H - \bar{T}_n^K)}. \quad (5)$$

Массовая доля продукта, находящегося в рабочей камере:

$$g_{cp} = G_n \tau_c / 60. \quad (6)$$

Площадь ситчатого днища рабочей камеры равна, м²:

$$s_c = G_n \tau_c / (60 q). \quad (7)$$

С целью лучшего перемещения продукта по ситчатой поверхности рабочей камеры с учетом полученного s_c конструктивно задаемся шириной B , м, и длиной $L = (s_c / B)$, м, камеры; $B = 1,0$ м, $L = 4,0$ м.

Учитывая расширение слоя при создании импульсного псевдоожиженного слоя, необходимо увеличить объем рабочей камеры на 130 %. Полный объем рабочей камеры равен, м³:

$$V_c = 1,3 g_{cp} / \rho, \quad (8)$$

где g_{cp} – масса продукта в рабочей камере, кг.

Рабочий объем аппарата, м³:

$$V = V_n + \Delta V_n^H - \Delta V_n, \quad (9)$$

где V_n – объем пара в рабочем объеме, м³; ΔV_n^H – приращение объема пара, поступающего на сушку, м³; ΔV_n – изменение объема пара, м³.

С учетом найденных значений G_n , G_k и G_n^{pec} имеем V , м³.

Мощность электродвигателя вентилятора контура рециркуляции:

$$N_B = V_n H_p / (1000 \cdot 3600 \cdot \eta_g \eta_{\partial g}), \quad (10)$$

где $V_n = G_n / \rho_n$ – объемный расход теплоносителя в контуре рециркуляции, м³/ч; H_p – перепад давления теплоносителя, Па; η_g и $\eta_{\partial g}$ – КПД, соответственно, вентилятора и электродвигателя.

Перепад давления теплоносителя H_p определяли с учетом гидравлического сопротивления λ :

$$\lambda = 862,15 / \bar{Re}_s^{1,05},$$

и обобщенного регрессионного уравнения для определения относительной усадки δ :

$$\delta = 2,098 e^{-0,062 \bar{U}} e^{-0,0055 t_n}.$$

Мощность электродвигателя дозаторов, кВт, равна:

$$N_{ин} = 1,25 \sum_{i=1}^4 N_{ин} / \eta_{\partial g} \quad (11)$$

Суммарная мощность установленных электродвигателей составляет $N_3 = N_B + N_{ин}$, кВт. Общая мощность парогенератора и пароперегревателя N_n , кВт, определяется по техническим характеристикам соответствующего оборудования [1].

Результатами расчета являются характеристики сушилки: производительность по готовому продукту G_k , кг/ч; площадь ситчатого днища рабочей камеры S_c , м²; ширина ситчатого днища рабочей камеры B , м; длина ситчатого днища рабочей камеры L , м; суммарная мощность электродвигателей N_3 , кВт; общая мощность парогенератора и пароперегревателя N_n , кВт; установленная мощность сушилки N , кВт.

Разработанная методика инженерного расчета легла в основу расчета и проектирования сушилки с транспортирующим органом в виде «бегущей волны».

На рисунке 3 представлено объемное изображение разработанной сушилки; на рисунке 4 – общий вид сушилки; на рисунке 5 –

поперечное сечение А-А сушилки; на рисунке 6 – объемное изображение реечного механизма перемещения четных роликов; на рисунке 7 – объемное изображение защитного кожуха четных роликов [2].

Сушилка (рисунки 3, 4 и 5) включает корпус 1, бункер загрузки 2 с ротационным питателем 3, имеющим регулируемый привод, патрубок 4 с конфузоре для подвода теплоносителя, патрубок 5 для отвода отработанного теплоносителя, выгрузочный бункер 6 для выгрузки высушенного продукта из сушилки, перфорированную ленту 8, привод 9, нечетные 10 и четные 11 ролики, реечный механизм 12 для перемещения четных роликов 11 в горизонтальной плоскости. Четные ролики 11 снабжены защитными кожухами 21, которые необходимы для того, чтобы частицы высушиваемого продукта, находящиеся на ленте 8, не вступали в контакт с четными роликами 11 (рисунк 7). Кожух 21 состоит из верхней крышки с эластичными прокладками 22 на концах в местах ее контакта с перфорированной лентой 8. Это необходимо для обеспечения плотности прилегания нижней части кожуха 21 к поверхности ленты 8 при регулировании угла обхвата четных роликов 11 лентой 8 при ее перемещении в горизонтальной плоскости.

Внутри корпуса 1 сушилки установлена гибкая перфорированная лента 8, которая приводится в движение приводом 9. На рабочей верхней ветви ленты 8 установлены с определенным шагом ролики 10 и 11. Нечетные ролики 10 установлены под лентой 8, а четные ролики 11 – над лентой 8, причем четные ролики 11 имеют возможность перемещаться в горизонтальной плоскости с помощью реечного механизма 12. Четные ролики 11 установлены с определенным шагом на направляющей 7, на нижней центральной части которой изготовлена зубчатая рейка 13. Она входит в зацепление с зубчатым колесом 14, которое приводится во вращение приводом 18. Таким образом, направляющая 7 перемещается с четными роликами 11 в горизонтальной плоскости по салазкам 15, которые жестко крепятся к опорной станине 19. Привод 18, приводящий во вращение зубчатое колесо 14, также жестко крепится к опорной станине 19. Опорная станина 19 имеет четыре регулируемые по высоте опоры 20. Опоры 20 обеспечивают заданное положение опорной станины по высоте, регулируя величину амплитуды «бегущей волны» ленты 8.

Рисунок 3. Объемное изображение сушилки

Рисунок 4. Общий вид сушилки

Рисунок 5. Поперечное сечение А-А сушилки

Рисунок 6. Объемное изображение реечного механизма перемещения четных роликов

Рисунок 7. Объемное изображение защитного кожуха четных роликов

Лента 8 огибает приводной барабан 17, соединенный с приводом 9 и натяжной барабан 16. Для компенсации изменения длины ленты 8 при перемещении четных роликов 11 в горизонтальной и вертикальной плоскостях натяжной барабан 16 имеет возможность перемещаться в горизонтальной плоскости. Верхняя рабочая ветвь ленты 8, контактируя с

роликами 10 и 11, образует своеобразную «бегущую волну», имеющую переменные по длине шаг и амплитуду. Именно на этом участке ленты 8 осуществляется процесс сушки поступающего в сушилку влажного продукта. Реечный механизм 12 для перемещения четных роликов 11 в горизонтальной плоскости (рисунок 6) состоит из направляющей 7, на

нижней центральной части которой изготовлена зубчатая рейка 13, зубчатого колеса 14, салазок 15. На направляющей 7 с определенным шагом установлены оси 23, на которых вращаются ролики 11. Опорная станина 19 с реечным механизмом 12 для перемещения четных роликов 11 в горизонтальной плоскости установлена по обе стороны сушилки (рисунок 5). Предложенная сушилка работает следующим образом.

Регулируя по высоте опоры 20, устанавливают заданный угол наклона опорной станины 19. При этом устанавливается такое вертикальное положение опорной станины 19, которое обеспечивает заданное значение величины амплитуды «бегущей волны» ленты 8. Величина амплитуды «бегущей волны» ленты 8 определяется углом естественного откоса высушиваемого материала (на рисунке 3 тонкими линиями показано регулируемое положение опорной станины 19). Затем включается привод 18, который приводит во вращение зубчатое колесо 14.

Колесо 14, контактируя с рейкой 13, синхронно перемещает по салазкам 15 в горизонтальной плоскости направляющую 7 с четными роликами 11 с обеих сторон корпуса сушилки. Одновременно натяжной барабан 16 перемещается в горизонтальной плоскости для компенсации изменения длины ленты 8 при перемещении четных роликов 11. При этом регулируется и устанавливается профиль верхней рабочей ветви ленты 8. Рабочая верхняя ветвь ленты 8, контактируя с роликами 10 и 11, образует своеобразную «бегущую волну», которая имеет переменные по длине шаг и амплитуду.

После этого привод 18 выключается. Величина вертикального перемещения четных роликов 11 влияет на параметры (шаг и амплитуду) образования переменной по длине «бегущей волны». В свою очередь угол естественного откоса высушиваемого продукта, который изменяется по длине верхней части ленты 8, определяет шаг и амплитуду «бегущей волны», которые регулируются путем вертикального и горизонтального перемещения четных роликов 11 при помощи опор 20 и реечного механизма 12. После установки требуемых параметров переменной по длине «бегущей волны» положение четных роликов 11 и натяжного барабана 16 жестко фиксиру-

ются, обеспечивая при этом достаточное натяжение ленты 8.

После этого в загрузочный бункер 2 подают влажный продукт. Включается регулируемый привод ротационного питателя 3, и влажный продукт поступает в сушилку на поверхность гибкой перфорированной ленты 8. Регулируемый привод ротационного питателя 3 позволяет обеспечить заданный темп подачи продукта на ленту 8, что особенно важно при сушке различных видов материалов. Затем включается привод 9, который с помощью приводного барабана 17 приводит в движение ленту 8. При этом влажный продукт, находящийся на ее поверхности, начинает вместе с ней перемещаться, пересыпаясь при этом. Защитные кожухи 21 с эластичными прокладками 22 предотвращают попадание частиц высушиваемого продукта, находящихся на ленте 8, под вращающиеся четные ролики 11 (рисунок 6). Эластичные прокладки 22 обеспечивают плотное прилегание нижней части кожуха 21 к поверхности ленты 8. Одновременно через патрубок 4 в сушильную камеру подается теплоноситель с заданными параметрами. Конструкция патрубка 4 с конфуззором обеспечивает подвод теплоносителя под ленту 8, не допуская перегрева привода 18 на опорной станине 19. Теплоноситель поступает в сушильную камеру, пронизывает в вертикальном направлении перфорированную ленту 8 и слой высушиваемого продукта на ней, поступает в патрубок 5 и удаляется из сушилки.

Режим работы привода 9 может меняться в зависимости от требуемого режима сушки: он может совершать как непрерывное движение; так и периодическое движение с выстоями. Далее обрабатываемый продукт, равномерно пересыпаясь и перемешиваясь на ленте 8, постепенно высушивается. Выгрузка высушенного продукта из сушилки происходит через выгрузочный бункер 6.

Использование сушилки с транспортирующим органом в виде «бегущей волны» для сушки пищевого растительного сырья позволит добиться равномерной сушки продукта вследствие использования мягких, щадящих режимов пересыпания при максимальном сохранении частиц обрабатываемого продукта; повысить качества готового продукта за счет использования пересыпающегося слоя, снижающего комкование высушиваемого продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1 Шевцов С.А., Остриков А.Н. Техника и технология сушки пищевого растительного сырья. Воронеж: ВГУИТ, 2014. 289 с.

2 Пат. 2256134 РФ Сушилка / Шевцов А.А., Остриков А.Н., Сизоненко О.А., Куцов С.В.; Опубл. 10.07.2005.

3 Шевцов С.А., Куцов С.В., Острикова Е.А. Математическое моделирование процесса обжарки овса перегретым паром // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2008. № 3. С. 10-12.

4 Шевцов А.А., Дранников А.В., Пономарев А.В., Лесных Т.В. Эксергетический подход к термодинамическому анализу процесса сушки свекловичного жома // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 12. С. 8-12.

5 Лыткина Л.И., Острикова Е.А., Клейменов А.И., Носкова В.Н. Гидродинамика процесса сушки гречихи перегретым паром // Вестник ВГУИТ. 2012. № 2. С. 48 -51.

REFERENCES

1 Shevtsov S.A., Ostrikov A.N. Tekhnika i tekhnologiya sushki pishchevogo rastitel'nogo syr'ya [Engineering and technology of food raw material drying]. Voronezh, VGUIT, 2014. 289 p. (In Russ.).

2 Shevtsov A.A., Ostrikov A.N., Sizonenko O.A., Kutsov S.V. Sushilka [Dryer]. Patent RF 2256134, no. 2256134, 2005. (In Russ.).

3 Shevtsov S.A., Kutsov S.V., Ostrikova E.A. Mathematical modeling of roasting oats by superheated steam. *Vestnik RASKhN*. [Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences], 2008, no. 3, pp. 10-12. (In Russ.).

4 Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Ponomarev A.V., Lesnykh T.V. Exergic approach to thermodynamic analysis of sugar beet pulp drying process. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*. [Storage and processing of agricultural raw materials], 2012, no. 12, pp. 8-12. (In Russ.)

5 Lytkina L.I., Ostrikova E.A., Kleimenov A.I., Noskova V.N. Hydrodynamics drying process buckwheat superheated steam. *Vestnik VGUIT*. [Bulletin of VSUET], 2012, no. 2, pp. 48 -51. (In Russ.).