

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
КОНВЕКТИВНО-ВАКУУМНОЙ СУШИЛКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯSUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF CONVECTION VACUUM DRYER  
OF PLANT RAW MATERIALS

**Ключевые слова:** искусственная сушка растительного сырья, блок-схема сушилки, материальный и тепловой балансы, уровень вакуума.

Сушилка, предложенная в ООО «Технологии без границ», является технологическим аппаратом нового поколения, в конструкции которого учтены последние достижения науки и практики в области теплового осушения растительного сырья. Рассмотрение затрат тепла в указанной сушилке показывает, что увеличения коэффициента полезного действия данной сушилки можно добиться за счет направления конденсата и использованной в конденсаторе воды на выработку технологического пара, используемого в калорифере этой же сушилки или других устройствах. Существует оптимальный уровень вакуумирования сушильной камеры, при котором интенсивность испарения, следовательно, и производительность сушилки достигают максимума. Установлено, что поддержание абсолютного давления в сушильной камере ниже парциального давления пара на поверхности сырья при данной температуре сушки нецелесообразно, поскольку это приводит к снижению коэффициента конвективного влагообмена. В связи со сказанным возникает следующее технологическое предложение. Поскольку требуемый уровень вакуума относительно невысок, то после проведения атмосферной конвективной стадии целесообразна такая вакуумная стадия, при которой вентиляторы (или их часть) не выключаются, а вакуумный насос в это время включается и работает до конца сушки. Периодически,

по мере надобности, подается лишь пар в калориферы, чтобы согреть сырье до требуемой температуры.

**Keywords:** artificial drying of plant raw materials, dryer block scheme, material and thermal balances, vacuum level.

The dryer, proposed by the company ООО "Tekhnologii bez granits" is a next-generation technology apparatus that takes into account the latest advances in science and practice in the field of thermal drying of plant raw materials. The study of the heat inputs in this dryer indicates that the efficiency of the dryer may be achieved by making condensate and condensed water produce the process steam used in the heater of this dryer or other devices. There is an optimal vacuuming level of the drying chamber when the evaporation intensity, and therefore the dryer performance, reaches the maximum. Maintaining absolute pressure in the drying chamber below the partial pressure of the steam on the surface of the raw materials at this drying temperature is impractical as it leads to a decrease in the ratio of convective moisture exchange with all the ensuing consequences. In connection with the above, the following technological proposal arises. Since the required vacuum level is relatively low, after the atmospheric convective stage, a vacuum stage is appropriate when the fans (or some of them) are not turned off and the vacuum pump at this time turns on and works until the end of drying. Periodically, as needed, only steam is fed into the heaters to warm up the raw materials to the required temperature.

**Федоренко Иван Ярославович**, д.т.н., проф., Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 203-271. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

**Землянухина Татьяна Николаевна**, к.с.-х.н., с.н.с., доцент, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: t.zemlyanukhina@mail.ru.

**Шилов Сергей Викторович**, директор, ООО «Технологии без границ», г. Бийск, Алтайский край. E-mail: Shilov\_hause@mail.ru.

**Орлова Наталья Алексеевна**, к.т.н., нач. научно-технического отдела, ООО «Технологии без границ», г. Бийск, Алтайский край. E-mail: orlova.tb@gmail.ru.

**Fedorenko Ivan Yaroslavovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 203-271. E-mail: ijfedorenko@mail.ru.

**Zemlyanukhina Tatyana Nikolayevna**, Cand. Agr. Sci., Senior Staff Scientist, Assoc. Prof., Altai State Agricultural University. E-mail: t.zemlyanukhina@mail.ru.

**Shilov Sergey Viktorovich**, Director, ООО "Tekhnologii bez granits", Biysk, Altai Region. E-mail: Shilov\_hause@mail.ru.

**Orlova Natalya Alekseyevna**, Cand. Tech. Sci., Head, Scientific and Technical Dept., ООО "Tekhnologii bez granits", Biysk, Altai Region. E-mail: orlova.tb@gmail.ru.

## Введение

Одним из надежных методов консервирования пищевых продуктов является сушка. Производство сушеных плодов, овощей и ягод явля-

ется важным путем удовлетворения потребностей различных отраслей пищевой промышленности, в конечном счете населения, в этих продуктах, содержащих в концентрированном виде

наиболее питательные и биологически активные вещества.

В распространенных конвективных сушилках задача достижения высоких значений коэффициентов массопереноса решается путем увеличения скорости (расхода) сушильного агента. Однако повышение расхода приводит к пропорциональному росту потерь теплоты, которую выносит с собой сушильный агент в окружающую среду. Эти противоречия являются проблемной ситуацией и не имеют кардинального решения в рамках конвективной сушки. Резервы повышения эффективности использования энергии в конвективных атмосферных сушилках практически исчерпаны.

Одним из путей создания ресурсосберегающих технологий сушки является применение вакуумирования рабочей камеры. Для получения продуктов высокого качества необходимо соблюдение научно обоснованных параметров, обеспечивающих стабилизацию температурного режима, определяемого, в частности, величиной вакуума, а также проведением процесса сушки строго в соответствии с основными его закономерностями. Таким образом, выявление таких закономерностей для производства фруктовых и овощных сушеных концентратов – актуальная задача, имеющая важное теоретическое и прикладное значение.

Процессы сушки в конвективно-вакуумных режимах относительно новы, поэтому многие проблемные задачи еще ждут своего решения. В частности, очень мало данных по комбинированной сушке растительного сырья, включающей повторяющиеся стадии рециркуляционной конвективной сушки и стадии вакуумной сушки.

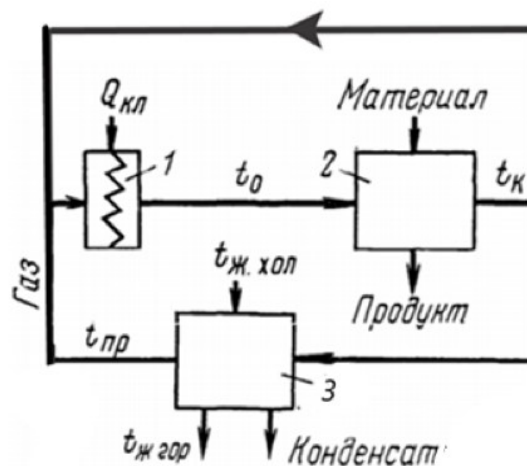
**Цель работы** – повышение эффективности процесса сушки плодоовощного сырья при конвективном способе подвода тепловой энергии на основе использования дополнительного вакуумного воздействия.

### Объект исследования

Рассмотрим функционально-параметрические особенности исследуемой нами сушилки, описание которой представлено в патенте на полезную модель № 195054 (патентообладатель ООО «Технологии без границ», г. Бийск) [1].

Сушилка представляет технологический аппарат периодического действия (рис.). Принцип ее работы заключается в том, что сушильный агент (воздух) подогревается внутри корпуса

сушилки калорифером 1. Затем горячий воздух просасывается вентиляторами через материал 2, подлежащий сушке, нагревает его и снимает часть влаги в виде пара. Далее часть сушильного агента направляется в конденсатор 3, где пар конденсируется на холодных поверхностях, после чего сушильный агент подогревается и снова подается в материал для сушки.



**Рис. Блок-схема сушилки (патент на полезную модель № 195054) с замкнутым циклом движения сушильного агента: 1 – калорифер; 2 – сушимый материал; 3 – конденсатор**

Другая часть агента циркулирует без осушения, но с постоянным подогревом.

Сушильный агент постоянно находится внутри аппарата, не выходя наружу. Так проходит стадия конвективной сушки. Во время вакуумной стадии сушильная камера соединяется с вакуумным насосом и в ней устанавливается пониженное, по сравнению с атмосферным, давление. Оставшийся сушильный агент также осушается в конденсаторе 3.

В процессе сушки стадии нагрева материала конвекцией постоянно сменяются вакуумными стадиями.

Таким образом, особенностями данной сушилки являются рециркуляция сушильного агента, осушение его конденсацией водяных паров, наличие вакуумных стадий.

Циркуляция сушильного агента внутри сушилки предотвращает непроизводительные выбросы тепла в окружающую среду вместе с сушильным агентом, как это имеет место в сушилках с однократным его использованием. Поэтому скорость циркуляции сушильного агента можно увеличить до того предела, при котором

частицы сушимого материала еще не будут уноситься воздушным потоком.

Подогреваемая в конденсаторе вода (за счет конденсации пара на холодных поверхностях) может быть использована в технологических целях, например, для выработки технологического пара.

Таким образом, сушилка, предложенная в ООО «Технологии без границ», является технологическим аппаратом нового поколения, в конструкции которого учтены последние достижения науки и практики в области термического осушения растительного сырья.

### Методы и результаты исследований

Рассмотрим сначала *материальный баланс* данной сушилки. Уравнение материального баланса высушиваемого материала в самом общем случае имеет вид

$$G_{\text{в}} = G_{\text{с}} + G_{\text{ж}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{в}}$ ,  $G_{\text{с}}$ ,  $G_{\text{ж}}$  – производительность сушильной установки, соответственно, по подаваемому в нее влажному материалу с начальной влажностью  $W_{\text{н}}$ , высушенному до требуемой влажности и покидающему сушилку материалу с конечной влажностью  $W_{\text{к}}$  и испаренной жидкости, кг/ч.

Количество (кг/ч) испаренной влаги в единицу времени

$$G_{\text{ж}} = G_{\text{в}} - G_{\text{с}}. \quad (2)$$

Важным показателем сушки является влажность материала – количество влаги, отнесенное к весу влажного материала:

$$W = \frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{с}} + G_{\text{ж}}}. \quad (3)$$

При рассмотрении процесса в сушилке должна быть задана начальная  $W_{\text{н}}$  и конечная  $W_{\text{к}}$  влажности материала. С учетом этих показателей может быть установлена связь между слагаемыми (1).

Количество высушенного материала, выходящего из сушилки:

$$G_{\text{с}} = G_{\text{в}} \frac{1 - W_{\text{н}}}{1 - W_{\text{к}}}.$$

Количество сырья, поступающего на сушку:

$$G_{\text{в}} = G_{\text{с}} \frac{1 - W_{\text{к}}}{1 - W_{\text{н}}}.$$

Количество влаги, удаляемой в сушилке:

$$G_{\text{ж}} = G_{\text{в}} - G_{\text{с}} = G_{\text{в}} \frac{W_{\text{н}} - W_{\text{к}}}{1 - W_{\text{к}}}.$$

При расчетах сушилок приходится относить производительность сушилок по высушенному

веществу к единице поверхности нагрева или единице объема сушилки  $V$ . Эта величину, зависящую от типа сушилки, влажности материала и других параметров, можно назвать *удельной производительностью сушилки*:

$$P_{\text{в}} = G_{\text{с}} / (\tau V), \quad (4)$$

где  $\tau$  – время сушки, с.

Величина  $P_{\text{в}}$  является одним из критериев, по которым могут сравниваться разные сушилки (или разные режимы работы одной и той же сушилки).

Исходя из уравнения материального баланса, можно определить, сколько воздуха  $L$  должно пройти через сушимое сырье. Имеем из уравнения баланса влаги

$$G_{\text{в}} W_{\text{н}} + L d_1 = G_{\text{с}} W_{\text{к}} + L d_2, \quad G_{\text{ж}} = L(d_2 - d_1),$$

где  $d_1$ ,  $d_2$  – влагосодержание воздуха на входе в контейнер с сушимым сырьем и выходе из него.

Откуда удельный расход сухого воздуха

$$L = L / G_{\text{ж}}, \quad l = \frac{1}{d_2 - d_1}.$$

Практически вся испаряемая из сырья влага конденсируется в самой сушилке на холодных поверхностях конденсатора. Последний должен иметь соответствующую производительность, чтобы сушильный агент постоянно освобождался от получаемого пара. В противном случае может подниматься давление в камере, а процесс сушки может замедлиться, или даже совсем прекратиться.

Имеем, в связи со сказанным, еще один материальный баланс:

$$G_{\text{ж}} = Q,$$

где  $Q$  – производительность конденсатора по переводу пара в воду (конденсат), кг/с.

Последний показатель можно подсчитать по формуле

$$Q = \frac{Q_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta t}{h_{\text{п}} - h_{\text{к}}},$$

где  $Q_{\text{в}}$  – расход охлаждающей воды, кг/с;

$c_{\text{в}}$  – теплоемкость воды;

$\Delta t$  – нагрев охлаждающей воды в конденсаторе;

$h_{\text{п}}$ ,  $h_{\text{к}}$  – теплосодержание пара и конденсата соответственно.

Рассмотрим далее *тепловой баланс* конвективно-вакуумной сушильной установки.

Составляющие прихода тепла  $Q_{\text{прих}}$  в сушилку:

- от источника тепла в калорифере, т.е. с сушильным агентом, нагреваемым в калорифере;
- с влагой материала;

- с материалом;
- с транспортными устройствами.

Расход тепла  $Q_{затр}$  составляют статьи:

- с уходящим воздухом (в период вакуумной стадии);
- с высушенным материалом;
- с транспортными устройствами;
- потери в окружающую среду;
- с удаляемым конденсатом;
- с хладоносителем конденсатора.

Формулы для подсчета отдельных статей прихода и расхода тепла можно найти в учебной и научной литературе [2, 3, 7].

Уравнение теплового баланса

$$Q_{прих} = Q_{затр}.$$

Остановимся далее на анализе КПД нашей сушилки.

Тепло  $Q_{исп}$ , затраченное на испарение влаги, является полезно использованным. Отношение этого тепла ко всему затраченному теплу  $Q_{затр}$  и есть КПД  $\eta$ , т. е.

$$\eta = \frac{Q_{исп}}{Q_{затр}} \cdot 100\%.$$

Рассмотрение статей затрат показывает, что увеличения КПД данной сушилки можно добиться за счет направления конденсата и использованной в конденсаторе воды на выработку технологического пара, используемого в калорифере этой же сушилки или других устройствах.

Разовьем далее важнейшую задачу о рациональном уровне вакуума в сушильной камере во время осуществления вакуумных стадий.

Интенсивность испарения влаги  $j$  с поверхности сушильного сырья можно оценить по формуле [3]

$$j = \alpha (p_2 - p_1), \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент влагообмена;

$p_1$  – парциальное давление пара в объеме сушильной камеры при данном влагосодержании;

$p_2$  – парциальное давление насыщенного пара при данной температуре  $t$ , наблюдаемое на поверхности сушильного сырья.

Давления  $p_1$  и  $p_2$  связаны зависимостью

$$\varphi = (p_1 / p_2) \cdot 100, \quad (6)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %.

Строго говоря, формула (5) справедлива только для стационарного процесса влагопереноса, каковым является период постоянной скорости сушки при конвективном теплообмене. Этот период можно характеризовать как изотер-

мический ( $t=const$ ), а испарение жидкости представить как идущее с ее поверхности.

Для нестационарных процессов возникает проблема зависимости коэффициента влагообмена  $\alpha$  от времени. Поэтому А.В. Лыков рекомендовал в этом случае использовать формулу (5) лишь для качественного анализа процесса сушки.

В конвективно-вакуумной сушилке коэффициент конвективного влагообмена существенно зависит от абсолютного давления  $p$  в камере сушки. Мысленно можно представить абсолютно безвоздушное пространство при  $p=0$ , для которого  $\alpha=0$ . Следовательно, в первом приближении, зависимость коэффициента влагообмена от давления можно представить в виде:

$$\alpha = \alpha_0 (p / p_{ам}), \quad (7)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент влагообмена при атмосферном давлении  $p_{ам}$ .

Изменение  $p$  во времени зависит от быстрого действия вакуумного насоса, и при учете этой характеристики в принципе можно получить описание нестационарного процесса. Но мы не будем этого делать, а продолжим рассматривать наш процесс сушки как квазистационарный, т.е. с медленным изменением во времени всех параметров сушки.

Представим далее, по Дальтону, давление  $p$  в камере сушки как сумму парциальных давлений водяного пара  $p_1$  и сухого воздуха  $p_{св}$

$$p = p_1 + p_{св}. \quad (8)$$

Парциальным для нашего случая является такое давление, которое имел бы каждый компонент, занимая весь объем сушильной камеры при той же температуре.

Выражая из последней формулы  $p_1$ , получим

$$p_1 = p - p_{св}. \quad (9)$$

Комбинируя формулы (5), (7) и (9), получим выражение

$$j = \alpha_0 \cdot (p / p_{ам}) \cdot (p_2 - p + p_{св}). \quad (10)$$

Интенсивность испарения нужно повышать, поэтому последнее выражение можно представить как функцию цели

$$j(p) = (\alpha_0 / p_{ам}) \cdot [(p_2 + p_{св}) p - p^2] \rightarrow \max. \quad (11)$$

При таком представлении видно, что критерий оптимальности  $j$  существенно зависит от абсолютного давления  $p$  в камере сушки. При этом параметры  $p_2$  и  $p_{св}$ , в силу принципа квазистационарности, считаем условно постоянными.

Найдем оптимальную точку  $p^*$ , используя выражение (11). Для этого, во-первых, вычислим первую производную

$$\begin{aligned} \frac{dj}{dp} &= \frac{\alpha_0}{p_{ат}} [(p_2 + p_{св})p - p^2]' = \\ &= \frac{\alpha_0}{p_{ат}} [(p_2 + p_{св}) - p^*]. \end{aligned}$$

Подозрительную на экстремум точку находим из выражения

$$(\alpha_0/p_{ат}) [(p_2 + p_{св}) - 2p^*] = 0,$$

откуда

$$p^* = (p_2 + p_{св}) / 2. \quad (12)$$

Во-вторых, вычисление второй производной дает результат

$$\frac{d^2 j}{dp^2} = -\frac{2\alpha_0}{p_{ат}} < 0.$$

Отрицательность второй производной позволяет утверждать, что в точке  $p^*$  наблюдается максимум.

Оценим полученный результат, заключенный в (12). По нему можно сделать следующие качественные выводы:

1) существует оптимальный уровень вакуумирования сушильной камеры, при котором интенсивность испарения, следовательно, и производительность сушилки, достигают максимума;

2) уровень вакуума ниже  $p_2$  ( $p_2$  – парциальное давление пара на поверхности сырья) нецелесообразен.

Далее нам потребуется оценка парциального давления  $p_2$  на поверхности сушеного сырья. Это давление существенно зависит от температуры  $t$  и может быть вычислено по формуле Антуана [4]

$$p_2 = 0,1333 \cdot 10^{8,074 - 1733(t + 233,84)}, \text{ кПа}. \quad (13)$$

Сопоставим наш полученный результат с имеющимися в научной литературе экспериментальными данными.

Авторы статьи [5] пришли к выводу, что глубокое разрежение среды при сушении древесины не позволяет максимально сократить продолжительность процесса, что объясняется значительным уменьшением коэффициента теплоотдачи между газовым носителем и влажным сырьем. Рациональными называются параметры давления 50-60 кПа при температуре 84-87°C.

Подставляя эти интервальные оценки температуры в формулу Антуана (13), получим

$$p_2 = 55,8 - 62,7 \text{ кПа}.$$

Согласно нашей теории, абсолютное давление вакуумной сушилки при этой температуре не

должно превышать данной величины, что практически совпадает с экспериментальным результатом 50-60 кПа, указанным в работе [4].

Из данных статьи [6], касающейся сушки овощного сырья на двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушилке, следует, что при температуре 50°C минимальное значение давления составляет 13 кПа.

По формуле Антуана при 50°C имеем  $p_2 = 12,4$  кПа, что опять близко к полученному экспериментально и рекомендуемому показателю  $p = 13$  кПа.

Таким образом, имеющиеся в литературе экспериментальные данные не противоречат выводам нашей теории.

В связи с этим возникает следующее технологическое предложение. Поскольку из выражения (12) следует, что требуемый уровень вакуума относительно невысок, то после проведения атмосферной конвективной стадии целесообразна такая вакуумная стадия, при которой вентиляторы (или их часть) не выключаются, а вакуумный насос в это время включается и работает до конца сушки. Периодически, по мере надобности подается лишь пар в калориферы, чтобы согреть сырье до требуемой температуры. Возможна непрерывная подача пара, но с уменьшающимся его расходом.

Очевидно, что постоянная циркуляция воздуха на поверхности сушеного сырья будет повышать коэффициент влагообмена. Это, в свою очередь, приведет к интенсификации процесса сушки и сокращению ее длительности по сравнению с импульсной сушилкой, когда периодически отключаются то вентиляторы, то вакуумные насосы.

### Выводы

1. Сушилка, предложенная в ООО «Технологии без границ», является технологическим аппаратом нового поколения, в конструкции которого учтены последние достижения науки и практики в области термического осушения растительного сырья.

2. Рассмотрение статей затрат тепла в указанной сушилке показывает, что увеличения КПД данной сушилки можно добиться за счет направления конденсата и использованной в конденсаторе воды на выработку технологического пара, используемого в калорифере этой же сушилки или других устройствах.

3. Установлено, что существует оптимальный уровень вакуумирования сушильной камеры, при котором интенсивность испарения, а, следовательно, и производительность сушки достигают максимума.

4. Поддержание абсолютного давления в сушильной камере ниже  $p_2$  ( $p_2$  – парциальное давление пара на поверхности сырья при данной температуре сушки) нецелесообразно, поскольку это приводит к снижению коэффициента конвективного влагообмена со всеми вытекающими отсюда последствиями.

5. В связи со сказанным возникает следующее технологическое предложение. Поскольку требуемый уровень вакуума относительно невысок, то после проведения атмосферной конвективной стадии целесообразна такая вакуумная стадия, при которой вентиляторы (или их часть) не выключаются, а вакуумный насос в это время включается и работает до конца сушки. Периодически, по мере надобности подается лишь пар в калориферы, чтобы согреть сырье до требуемой температуры. Возможна непрерывная подача пара, но с уменьшающимся его расходом.

#### Библиографический список

1. Патент № 195054 Российская Федерация, МПК F26B 9/06. Барабанная сушилка / Платицын А. А., Шилов С. В.; патентообладатель: ООО «Технологии без границ». – № 2019133538; заявл. 22.10.2019; опублик. 14.01.2020, Бюл. № 2. – Текст: непосредственный.

2. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – Москва: Высшая школа, 1991. – 400 с. – Текст: непосредственный.

3. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – 2-е издание. – Москва: Энергия, 1968. – 471 с. – Текст: непосредственный.

4. Термодинамические свойства и процессы влажного воздуха / В.С. Белоусов [и др.]. – Екатеринбург; УГТУ-УПИ, 2005. – 22 с. – Текст: непосредственный.

5. Вакуумно-конвективная сушка измельченного растительного сырья / Р. Р. Сафин [и др.] –

Текст: непосредственный // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 22. – С. 63-67.

6. Инновационные технологии сушки и растительного сырья / Ю.Г. Скрипников [и др.]. – Текст: непосредственный // Вопросы современной науки и практики / Университет им. В.И. Вернадского. – 2012. – № 3 (41). – С. 371-376.

7. Nema, P., Kaur, B., Mujumdar, A. (2015). Drying Technologies for Foods: Fundamentals and Applications. 10.13140/RG.2.1.1839.5687.

#### References

1. Pat. 195054 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F26B 9/06. Barabannaya sushilka / A.A. Platitsyn, S.V. Shilov; patentoobladatel: ООО «Tekhnologii Bez Granits». – No. 2019133538, zayavl. 22.10.2019; opubl. 14.01.2020. Byul. No. 2.

2. Kafarov V.V. Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv / V.V. Kafarov, M.B. Glebov. – Moskva: Vysshaya shkola, 1991. – 400 s.

3. Lykov A.V. Teoriya sushki / A.V. Lykov – 2-e izdanie – Moskva: Energiya, 1968. – 471 s.

4. Termodinamicheskie svoystva i protsessy vlazhnogo vozdukha / V.S. Belousov i [dr.]. – Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2005. – 22 s.

5. Vakuumno-konvektivnaya sushka izmelchennogo rastitelnogo syrya / R.R. Safin i [dr.]. // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. – 2016. – T. 19. – No. 22. – S. 63-67.

6. Innovatsionnye tekhnologii sushki i rastitelnogo syrya / Yu.G. Skripnikov i [dr.] // Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo. – 2012. – No. 3 (41). – S. 371-376.

7. Nema, P., Kaur, B., Mujumdar, A. (2015). Drying Technologies for Foods: Fundamentals and Applications. 10.13140/RG.2.1.1839.5687.

*Работа выполнена при финансовой поддержке краевого автономного учреждения «Алтайский центр кластерного развития» (хоздоговор № 51/5).*

