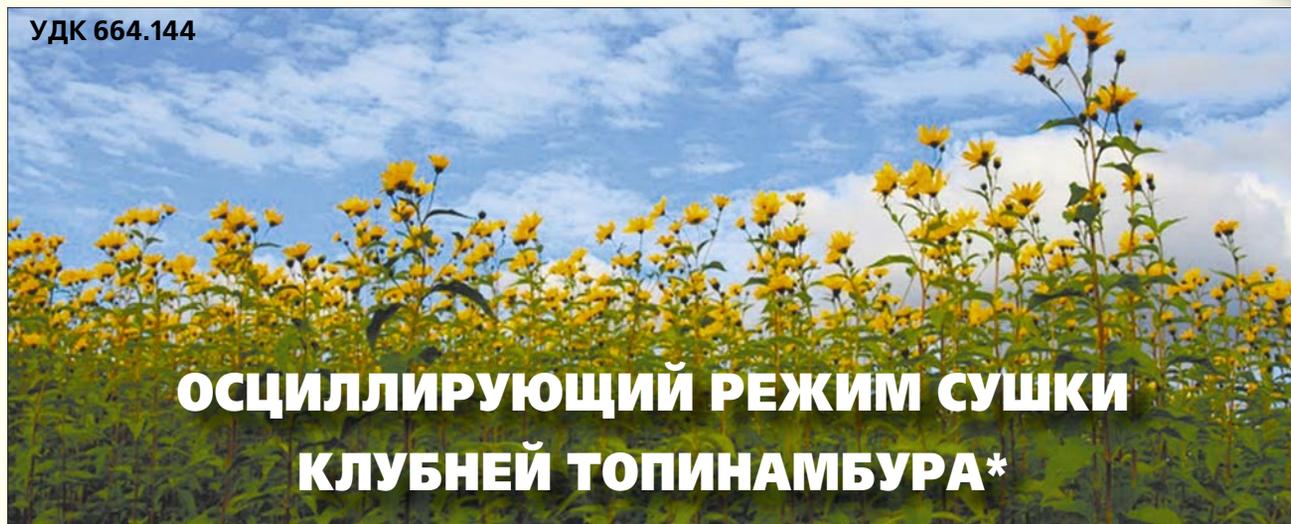


УДК 664.144



ОСЦИЛЛИРУЮЩИЙ РЕЖИМ СУШКИ КЛУБНЕЙ ТОПИНАМБУРА*

А.В.ГОЛУБКОВИЧ,
ДОКТ. ТЕХН. НАУК,

С.А.ПАВЛОВ,
КАНД. ТЕХН. НАУК,

Н.С.ЛЕВИНА,
СТ. НАУЧ. СОТР.,

Т.А.КОНДРАТОВА,
ИНЖЕНЕР

Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, e-mail: agolubkovich@yandex.ru,
Москва, Российская Федерация

Специфика химического состава клубней и зеленой массы топинамбура, высокая продуктивность и экологическая пластичность, экономичность возделывания, биотехнологический потенциал использования позволяют отнести топинамбур к числу высокоэнергетических культур будущего. Высокая влажность различных частей топинамбура, особенности механизма тепломассопереноса ставят задачу поиска новых методов сушки, способствующих повышению эффективности процесса обезвоживания и получению продукта высокого качества. Разработали методику расчета длительности осциллирующего режима сушки клубней топинамбура в плотном слое. В качестве объекта исследований взяли клубни топинамбура, нарезанные на кубики со стороной 6 мм. Исследования проводили при использовании различных режимов сушки: два опыта при осциллирующем режиме с высотой слоя материала 0,07 м и 0,17 м; а также контрольный опыт – сушка материала при постоянной температуре агента сушки. Получили кривые изменения влагосодержания при различных режимах сушки и на их основе рассчитали длительность осциллирующего режима сушки клубней топинамбура. Подтвердили экспериментальными данными расчетные показатели. Результаты определения длительности осциллирующих режимов сушки клубней топинамбура показали, что эффективность осциллирующих режимов на 18 процентов выше, чем в контрольном опыте.

Ключевые слова: топинамбур, влагосодержание, сушка, осциллирующий режим.

В последнее время для решения продовольственных, топливно-энергетических и экологических проблем большой практической интерес представляет топинамбур, ценность которого определяется высокой экологической пластичностью, продуктивностью, экономичностью возделывания, уникальным химическим составом и универсальностью использования. Благодаря богатому составу биологически активных веществ и применению новых технологий обработки, в частности технологии высушивания, открыта перспектива использования клубней топинамбура в пищевой промышленности в качестве основы для диетического питания и сырья для уникальных целебных средств.

Выбор оптимального способа сушки продукта определяется природой материала и требованиями к качеству готовой продукции. Относительно высокая влажность клубней топинамбура, а также особенности механизма внутреннего тепломассопереноса затрудняют использование традиционных способов обезвоживания и ставят задачу поиска новых методов, позволяющих повысить эффективность проведения процесса сушки и получить конечный продукт высокого качества. Известен ряд способов сушки дисперсных термочувствительных растительных материалов: в псевдооживленном слое при осциллирующем режиме [1, 2]; двухэтапная сушка в плотном и псевдооживленном слое с чередующимися кратковременными периодами при различ-

*Статья подготовлена в рамках выполнения Программы Союзного государства «Инновационное развитие производства картофеля и топинамбура» Государственного контракта № 243/19 от 18 февраля 2014 года. Договор № 15/03-2014 от 17 марта 2014 года.

ной температуре и скорости сушки; конвективный – со ступенчатым режимом; сорбционно-конвективный и конвективно-вакуумный методы сушки [3-5]; сублимационная сушка и др. Эти способы позволяют получать высококачественные пищевые продукты. Но они энергозатратны и недостаточно учитывают влагоотдающие свойства таких высоковлажных и термочувствительных материалов, как клубни топинамбура.

Проведенные аналогичные исследования по сушке растительных материалов высокого начального влагосодержания в слое различного состояния при осциллирующем режиме показали эффективность указанного процесса по технико-экономическим и качественным показателям [6-8]. Поэтому логично предположить и эффективность осциллирующего режима для сушки клубней топинамбура.

Цель исследований – разработка методики расчета длительности осциллирующего режима сушки клубней топинамбура в плотном слое.

Материалы и методы. Расчет проводили на основе уравнений Лыкова А.В. [3]. Скорость сушки в первый период рассчитана по уравнению массопереноса с учетом средней температуры агента сушки и длительности периодов нагрева и охлаждения нарезанных на кубики клубней топинамбура.

В общем случае на кривой сушки растительных материалов можно отметить ряд характерных периодов: нагрева τ_0 , постоянной τ_1 и падающей τ_2 . скорости сушки. Периодом τ_0 обычно пренебрегают.

Максимальная скорость сушки N , %/ч (или 1/ч) в периоде τ_1 вычисляется по известной формуле:

$$N = \frac{F \cdot J_m}{V \cdot \rho_0}, \quad \% / \text{ч}, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³; F и V – соответственно, площадь поверхности и объем материала, м² и м³; J_m – интенсивность испарения влаги с поверхности высушиваемого материала, кг/(м²·ч).

$$J_m = \alpha \cdot (t_1 - t_{MT}) / r, \quad \text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, ккал/(м²·°С·ч); r – теплота парообразования жидкости, ккал/кг; t_1 – температура сушильного агента, °С; t_{MT} – температура мокрого термометра, °С.

Период τ_1 постоянной скорости сушки продолжается до критического влагосодержания $\omega_{кр}$. С этого момента температура материала непрерывно повышается, а скорость сушки постоянно убывает. Для расчета процесса сушки по методу Лыкова А.В. необходимо определить приведенное критическое влагосодержание $\bar{\omega}_{кр}$:

$$\bar{\omega}_{кр} = 1/\chi + \omega_p, \quad \% , \quad (3)$$

где ω_p – равновесное влагосодержание, %; χ – относительный коэффициент сушки, $\chi \approx 1,8/\omega_n$; ω_n – начальное влагосодержание, %.

Приведенное критическое влагосодержание зависит от рода и размеров материала и режимных параметров сушки: температуры t_1 , скорости V и влажности φ сушильного агента [8].

$$\bar{\omega}_{кр} = \omega_{кр} + 1/\Gamma \cdot (J_m \cdot R) / (a_m \cdot \rho_0), \quad \% , \quad (4)$$

где R – характерный размер материала, м;

Γ – коэффициент формы материала: для пластины $\Gamma = 3$, для цилиндра $\Gamma = 4$, для шара $\Gamma = 5$, для кубиков клубней топинамбура примем $\Gamma = 5$;

a_m – коэффициент диффузии, м²/с.

Для расчета продолжительности сушки в первом периоде используется уравнение:

$$\tau_1 = \frac{1}{N} \cdot (\omega_n - \bar{\omega}_{кр}) = \frac{\rho_0 \cdot V}{J_m \cdot F} \cdot \frac{(\omega_n - \bar{\omega}_{кр})}{100}, \quad \text{ч}. \quad (5)$$

Для второго периода сушки:

$$\tau_2 = \frac{1,28 \cdot \omega_n}{N} \cdot \log \frac{\bar{\omega}_{кр} - \omega_p}{\omega_{кон} - \omega_p}, \quad \text{ч}, \quad (6)$$

где $\omega_{кон}$ – конечное влагосодержание, %

Величину N из (1) при осциллирующем режиме можно представить в виде:

$$N = K \cdot \frac{\alpha \cdot (t_{cp} - t'_{MT})}{r} \cdot f \cdot \frac{h_n}{H} \cdot 100, \quad (7)$$

где K – коэффициент, определяемый экспериментально;

α – коэффициент теплоотдачи, ккал/(м²·°С·ч);

t_{cp} – средняя температура агента сушки при осциллировании, °С (для симметричного осциллирования $t_{cp} = \frac{t_{max} + t_{min}}{2}$),

t'_{MT} – средняя температура мокрого термометра, °С;

f – удельная поверхность материала, м²/кг;

H – высота слоя материала, м;

h_n – высота тонкого слоя, в котором частицы имеют одинаковую температуру, м;

$$h_n = (5 \dots 6) \cdot d_n,$$

где d_n – приведенный диаметр частиц, м.

Выражение (7) позволяет учесть основные факторы, влияющие на скорость осциллирующего режима сушки в первом периоде.

Зная значения ω_n , $\omega_{кр}$, H , t_{max} , t_{min} , скорость агента сушки V , учитывая, что в конце сушки сторона кубика топинамбура сокращается в 1,9 раза, можно из формулы (7) определить величину N . Коэффициент K определяется при сравнении расчетной величины N с экспериментальной.

Методика подготовки и проведения процесса сушки клубней топинамбура состояла в следующем: клубни нарезали на кубики размером 6×6×6 мм,

бланшировали, сульфитировали, загружали в кассету диаметром 0,1 м, высотой слоя 0,07 м и 0,17 м и продували попеременно подогретым до 90°С и наружным воздухом температурой 22°С.

Проведены три опыта: *первый* – при продувке слоя с периодом 5 мин подогретым и 5 мин неподогретым воздухом; *второй* – с отношением периодов 5/3 мин при толщине слоя $H=0,07$ м; *третий* опыт – с отношением периодов 5/3 мин, но с высотой слоя $H=0,17$ м. Соотношения периодов продувки клубней топинамбура приняты на основе рекогносцировочных исследований. Был проведен также контрольный (*четвертый*) опыт с постоянной температурой агента сушки, равной 60°С. Во всех опытах скорость агента сушки $V=0,65$ м/с.

Каждые 10 мин (первый и четвертый опыты) и 8 мин (второй и третий) регистрировали температуру материала, взвешивали кассету и по убыли влаги определяли влагосодержание.

При проведении опытов использовали автоматизированный измерительный комплекс «Терем 4», позволяющий постоянно регистрировать температуру и относительную влажность отходящего агента сушки.

Результаты и обсуждение. По результатам исследования получены кривые влагосодержания, скорости сушки и изменения температуры материала (рис. 1-3) для четырех режимов сушки топинамбура.

Анализ кривых влагосодержания показывает, что продолжительность сушки при осциллировании сокращается, по сравнению с контрольным опытом. Как показывает анализ кривых скорости сушки, продолжительность периода постоянной скорости при осциллировании возрастает за счет более мягкого режима сушки, что благоприятно сказывается на сохранении качественных показателей. Максимальная интенсивность сушки достигается при критическом влагосодержании, которое наступает при более низких значениях, чем при постоянном теплоподводе, и обуславливается сложением потенциалов переноса. Следовательно, диффузия влаги к поверхности кубиков осуществляется легче.

Несмотря на высокое значение температуры теплоносителя в период нагрева, средняя температура материала в слое сопоставима для всех режимов, а также сопоставимы температуры нагрева материала как при сушке, так и по окончании ее.

Установлено, что положительное влияние осциллирования на интенсификацию сушки в основном приходится на первый период сушки, доля которого составляет примерно 20% от всего процесса, а оптимальный по длительности сушки интервал – с периодами 5/3 мин.

В процессе исследований кубики клубней топинамбура размером 6×6×6 мм с исходной влажностью 81% в плотном слое с начальной высотой

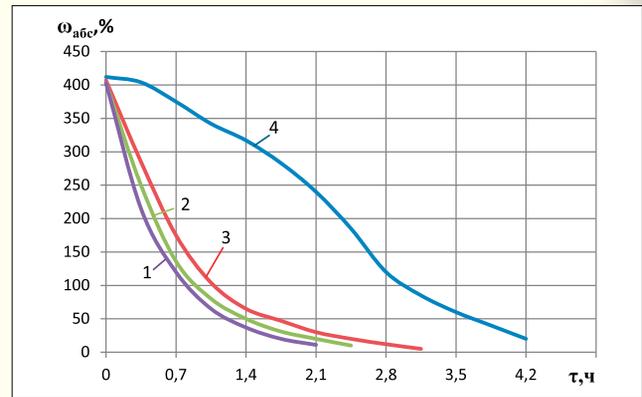


Рис. 1. Изменение влагосодержания клубней топинамбура в процессе сушки

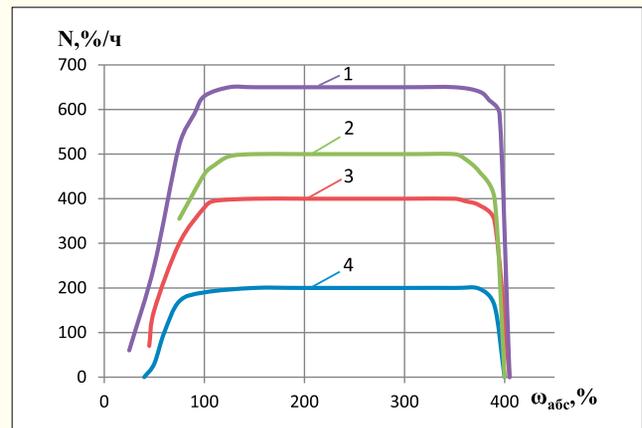


Рис. 2. Зависимость скорости сушки от влагосодержания

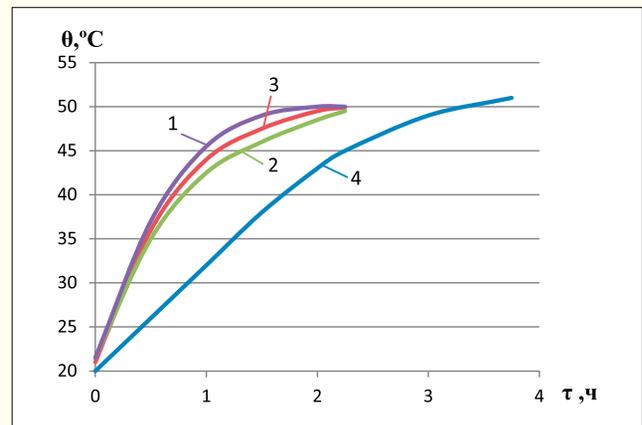


Рис. 3. Зависимость температуры материала от длительности сушки:

1 – осциллирующий режим с периодами сушки 5/5 мин, $H=0,07$ м
 2 – осциллирующий режим с периодами сушки 5/3, $H=0,07$ м
 3 – осциллирующий режим с периодами сушки 5/3, $H=0,17$ м
 4 – контрольный опыт при постоянной температуре сушки, $H=0,07$ м

$H=0,07$ м высушивали до конечной влажности, равной 12%, при равновесной влажности 6%.

В опыте с периодами 5/3 мин температура агента сушки составила 90 и 32°С, при $t_{cp}=61$ °С; $t_{MT} \approx 25$ °С.

В контрольном опыте при тех же значениях высоты слоя его температура составляла 60°C.

Для средних значений высоты слоя и высоты кубика топинамбура в первом периоде 0,17 м и 4,5 мм соответственно при средней объемной массе 0,42 т/м³ получим $f = 2,2$ м²/кг. Величина коэффициента теплоотдачи составит $\alpha \approx 25$ ккал/(м²·°С·ч); величина $a_{\text{м}} = 0,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с [2]. Величину $\omega_{\text{кр}}$ можно приближенно принять равной 100% [8].

После несложных расчетов из (4) получим: при $\omega_{\text{кон}} = 10\%$ и $\omega_{\text{р}} = 6\%$, $\omega_{\text{кр}} = 100 + 130 = 230\%$; $N = 610\%$ /ч. Время сушки, рассчитанное по (5) и (6): $\tau_1 = 0,3$ ч; $\tau_2 = 1,5$ ч, что в итоге составило 1,8 ч. Фактическое время сушки разрезанных клубней топинамбура

при осциллирующем режиме составило 2 ч, что в 1,1 раза выше значения, рассчитанного по (5) и (6), то есть погрешность принятой модели составляет не более 10%.

Выводы

В контрольном опыте при постоянной температуре сушки клубней топинамбура в тех же условиях длительность сушки составила 2,36 ч. Сравнение расчетной величины длительности сушки при осциллирующем режиме с результатами контрольного опыта позволило получить коэффициент $K = 1,18$, свидетельствующий о том, что эффективность осциллирующего режима сушки, по сравнению с постоянным режимом, оказалась выше на 18%.

Литература

1. Зуев И.А. Научное обеспечение и разработка способа сушки топинамбура при комбинированных гидродинамических режимах: Дисс. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2006. – 202 с.

2. Пат. 2256379 Российской Федерации, МПК А23L1/10. Способ производства сушеного топинамбура / Остриков А.Н., Зуев И.А.; заявитель и патентообладатель Воронежская государственная технологическая академия. – № 2004114518, заявл. 12.05.2004; опубл. 20.07.2005, Бюл. № 20.

3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

4. Шаршунов В.А., Рукиан Л.В. Сушка и хранение зерна. – Минск: Мисанта, 2010. – 588 с.

5. Петрова Ж.А. Влияние различных методов и режимов сушки на сохранность каротиноидов: Сб. материалов Второй Междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005». – М.: СЭТТ, 2005. – Т. 2 – С. 305-308.

6. Голубкович А.В., Павлов С.А. Тепломассоперенос при двухэтапной сушке // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – № 4. – С. 26-30.

7. Голубкович А.В., Павлов С.А. Совершенствование технологии сушки семян и зерна повышенной влажности // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2011. – № 3. – С. 21-24.

8. Любошиц И.Л., Слободкин Л.С., Пикус И.Ф. Сушка дисперсных термочувствительных материалов. – Минск: Наука и техника, 1969. – 214 с.

References

1. Zuev I.A. Nauchnoe obespechenie i razrabotka sposoba sushki topinambura pri kombinirovannykh gidrodinamicheskikh rezhimakh [Science service and development of a method of topinambur drying at the combined hydrodynamic modes]: Diss. ... kand. tekhn. nauk. Voronezh, 2006. 202 p. (Russian).

2. Pat. 2256379 Rossiyskoy Federatsii, MPK A23L1/10. Sposob proizvodstva sushenogo topinambura [Method of a dried topinambur production]. Ostrikov A.N., Zuev I.A.; zayavitel' i patentoobladatel' Voronezhskaya gosudarstvennaya tekhnologicheskaya akademiya. № 2004114518, zayavl. 12.05.2004; opubl. 20.07.2005, Byul. № 20. (Russian).

3. Lykov A.V. Teoriya sushki [Drying theory]. M.: Energiya, 1968. 472 p. (Russian).

4. Sharshunov V.A., Rukshan L.V. Sushka i khranenie zerna [Drying and storage of grain]. Minsk: Misanta, 2010. 588 p. (Russian).

5. Petrova Zh.A. Vliyanie razlichnykh metodov i

rezhimov sushki na sokhrannost' karotinoidov [Influence of various methods and modes of drying on carotenoids safety]: Sb. materialov Vtoroy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Sovremennyye energosberegayushchie teplovyte tekhnologii (sushka i teplovyte protsessy) SETT-2005». M.: SETT, 2005. T. 2. pp. 305-308 (Russian).

6. Golubkovich A.V., Pavlov S.A. Teplomassoperenos pri dvukhetapnoy sushke [Heat and mass transfer at two-stage drying]. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2010. No 4. pp. 26-30 (Russian).

7. Golubkovich A.V., Pavlov S.A. Sovershenstvovanie tekhnologii sushki semyan i zerna povyshennoy vlazhnosti [Improvement of technology of drying of humidity seeds and grain]. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2011. No 3. pp. 21-24 (Russian).

8. Lyuboshits I.L., Slobodkin L.S., Pikus I.F. Sushka dispersnykh termochuvstvitel'nykh materialov [Drying of disperse heat-sensitive materials]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1969. 214 p. (Russian).

OSCILLATING MODE OF TOPINAMBUR TUBERS DRYING

Golubkivich A.V., D.Sc.(Eng.), **Pavlov S.A.**, Cand.Sc.(Eng.), **Levina N.S.**, **Kondratova T.A.** All-Russian Research Institute of Mechanization for Agriculture, e-mail: vim@vim.ru, Moscow, Russian Federation

*Specifics of a chemical composition of tubers and green material of a topinambur (*Helianthus tuberosus*), high efficiency and ecological plasticity, profitability of growing, biotechnological potential of use enable to identify a topinambur as a of high-energy cultures of the future. High moisture of various topinambur parts, features of the mechanism of a heat and mass transfer set a problem of search of the new drying methods promoting to increase dehydration efficiency and produce a quality product. A method of calculation of duration of the oscillating mode of topinambur tubers drying in a dense layer is worked out. The topinambur tubers cut on cubes with the side of 6 mm were taken as object of researches. Researches were conducted in the setting of various drying modes: two experiences at the oscillating mode with height of a material layer of 0.07 m and 0.17 m; and also as a check experiment was material drying at a constant temperature of the drying agent. Duration of the oscillating mode of topinambur tubers drying was calculated on their basis of received curves of changes of moisture content at various modes of drying. Estimate indicators were confirmed with experimental data. Results of determination of duration of the oscillating modes of topinambur tubers drying proved that efficiency of the oscillating modes is 18 percent higher, than at control experiment.*

*Keywords: Topinambur (*Helianthus tuberosus*); Moisture content; Drying; Oscillating mode.*

**Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский институт
механизации сельского хозяйства
(ФГБНУ ВИМ)
объявляет набор
в докторантуру и аспирантуру**

по следующим направлениям:

Автоматизация и управление технологическими процессами в растениеводстве;
Механизация почвообработки и посева; Механизация производства картофеля;
Механизация применения удобрений; Механизация экологически устойчивого
почвозащитного земледелия; Механизация производства корнеплодов;
Механизация уборки урожая зерновых культур; Механизация послеуборочной
обработки зерна и подготовки семян; Механизация производства кормов;
Разработка мобильных энергетических средств для растениеводства;
Энергосберегающее обеспечение сельского хозяйства топливно-энергетическими
ресурсами; Механизация погрузочно-разгрузочных и транспортных работ.

**Адрес института: 109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5.
Телефон для справок: 8 (499) 174-89-29.**