

УДК 62-93

UDC 62-93

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

05.20.01 Technologies and means of agricultural mechanization (technical sciences)

**МОБИЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ СУШИЛКА****MOBILE HYBRID DRYER**

Побединский Андрей Анатольевич  
канд. техн. наук, доцент  
РИНЦ SPIN-код: 2904-5507  
[conf.mti@mail.ru](mailto:conf.mti@mail.ru)

Pobedinsky Andrey Anatolevich  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
RSCI SPIN-code: 2904-5507  
[conf.mti@mail.ru](mailto:conf.mti@mail.ru)

*ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», г. Тюмень, Российская Федерация*

*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia*

В настоящее время, чтобы уменьшить потери зерна за счет своевременной сушки, предпочтительны газовые и дизельные сушилки, поскольку они обеспечивают более качественный процесс сушки и конечного продукта. Но они дорогостоящие и требуют значительного количества топлива для работы, что приводит к высокой стоимости сушки. Одним из вариантов сушки для малых фермерских хозяйств, расположенных в районах с большим количеством жарких солнечных дней, приходящихся на период послеуборочной обработки, можно рассматривать применение гибридных сушилок, работающих на биомассе и солнечной энергии. Их можно применять в качестве альтернативной технологии сушки, это экологично и экономически целесообразно для мелких фермеров. В статье рассмотрена мобильная гибридная сушилка, которая состоит из трех основных частей: сушильная камера, солнечная фотоэлектрическая система и печь для биомассы. Сушилка может устанавливаться на прицеп, агрегатироваться с трактором и перемещаться в необходимое место. Расчетная производительность сушилки составляет около одной тонны кукурузы на партию. В среднем, для сушки зерна кукурузы с 19 до 13 % в гибридной сушилке потребуется 5 часов, в результате чего средняя скорость сушки составит 1,2 %·час по сравнению с 0,4 %·час для зерна, высушенного на открытом солнце. Сушка зерен, в основном, происходит в период снижения скорости, который включает удаление влаги из зерен кукурузы за счет процесса диффузии, при котором влага изнутри переносится к поверхности зерен. Эффективный коэффициент диффузии влаги для зерна кукурузы находится в допустимом диапазоне (от  $10^{-12}$  до  $10^{-8}$  м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>) для сушки подобных биологических материалов

Currently, gas and diesel dryers are preferred to reduce grain losses through timely drying, as they provide a better drying process and end product. But they are expensive and require a significant amount of fuel to operate, resulting in high drying costs. Hybrid biomass solar dryers can be considered as one drying option for small farms located in areas with a lot of hot, sunny days during post-harvest. It can be used as an alternative drying technology, which is environmentally friendly and cost effective for small farmers. The article discusses a mobile hybrid dryer, which consists of three main parts: drying chamber, solar photovoltaic system, and biomass oven. The dryer can be mounted on a trailer, aggregated with a tractor and moved to the required place. The design capacity of the dryer is about one ton of corn per batch. On average, it takes 5 hours to dry corn kernels from 19% to 13% in a hybrid dryer, resulting in an average drying rate of 1.2% per hour, compared to 0.4% per hour for sun-dried corn. Drying of the kernels generally occurs during a period of deceleration, which involves removing moisture from the corn kernels through a diffusion process in which moisture is transferred from the inside to the surface of the kernels. The effective moisture diffusion coefficient for corn grain is within the acceptable range (from  $10^{-12}$  to  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>) for drying such biological materials

Ключевые слова: СУШКА ЗЕРНА; МОБИЛЬНАЯ СУШИЛКА; СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ; БИОМАССА

Keywords: GRAIN DRYING; MOBILE DRYER; SOLAR ENERGY; BIOMASS

DOI: <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-171-016>

Кукуруза выращивается практически во всем мире и служит сырьем во многих отраслях промышленности для производства кормов животным, пищевых материалов и некоторых напитков [1]. Однако, в послеуборочной обработке, имеются потери кукурузы, связанные с неправильной и (или) несвоевременной сушкой. Чтобы уменьшить потери зерна за счет своевременной сушки, предпочтительны газовые и дизельные сушилки, поскольку они обеспечивают более качественный процесс сушки и конечного продукта [2]. Но они дорогостоящие и требуют значительного количества топлива для работы, что приводит к высокой стоимости сушки. Одним из вариантов сушки для малых фермерских хозяйств, расположенных в районах с большим количеством жарких солнечных дней, приходящихся на период послеуборочной обработки, можно рассматривать применение гибридных сушилок, работающих на биомассе и солнечной энергии. Их можно применять в качестве альтернативной технологии сушки, это экологично и экономически целесообразно для мелких фермеров [3].

**Материал и методы исследования.** Мобильная гибридная сушилка состоит из трех основных частей: сушильная камера, солнечная фотоэлектрическая система и печь для биомассы (рис. 1). Сушилка может устанавливаться на прицеп, агрегатироваться с трактором и перемещаться в необходимое место. Расчетная производительность сушилки составляет около одной тонны кукурузы на партию. Сушильная камера представляет собой конструкцию типа теплицы, крыша которой со всех сторон покрыта прозрачным листом с защитой от ультрафиолетового излучения толщиной. Сушильная камера разделена в продольном направлении на две части, каждая из которых состоит из трех частей, а каждая зеркальная часть представлена четырьмя уровнями. Каждый уровень вмещает шесть подвижных сушильных лотков, по три с каждой стороны. Лотки изготавливаются из дерева, а основание закреплено перфорированной пластиковой сеткой для удерживания высушиваемого зерна. Подвижные поддоны установлены на

стальной раме и расположены на расстоянии, обеспечивающем плавный поток агента сушки (воздуха) сверху и снизу зерна, предотвращая необходимость перемешивания во время сушки. Листы с обеих сторон сушильной камеры имеют плоские стержни, которые обеспечивают быстрый доступ к лоткам для загрузки и разгрузки во время сушки.



1 – солнечная фотоэлектрическая система; 2 – топка с закрытым теплообменником и дымоходом; 3 – сушильная камера с сушильными стеллажами

Рисунок 1 – Мобильная гибридная сушилка

Гибридная сушилка объединена с печью, в которой установлен теплообменник с перекрестным потоком. Сырье из биомассы (например, початки кукурузы), сжигается в печи для получения горячего воздуха (рис. 2), который направляется в сушильную камеру с помощью вентилятора. Таким образом, обеспечивается возможность процесса сушки в периоды отсутствия солнечного света. Установленная фотоэлектрическая система с резервной батареей обеспечивает возможную работу сушилки в местах, где нет доступа к электричеству, а также в ночное время, в пасмурные и (или) дождливые периоды.

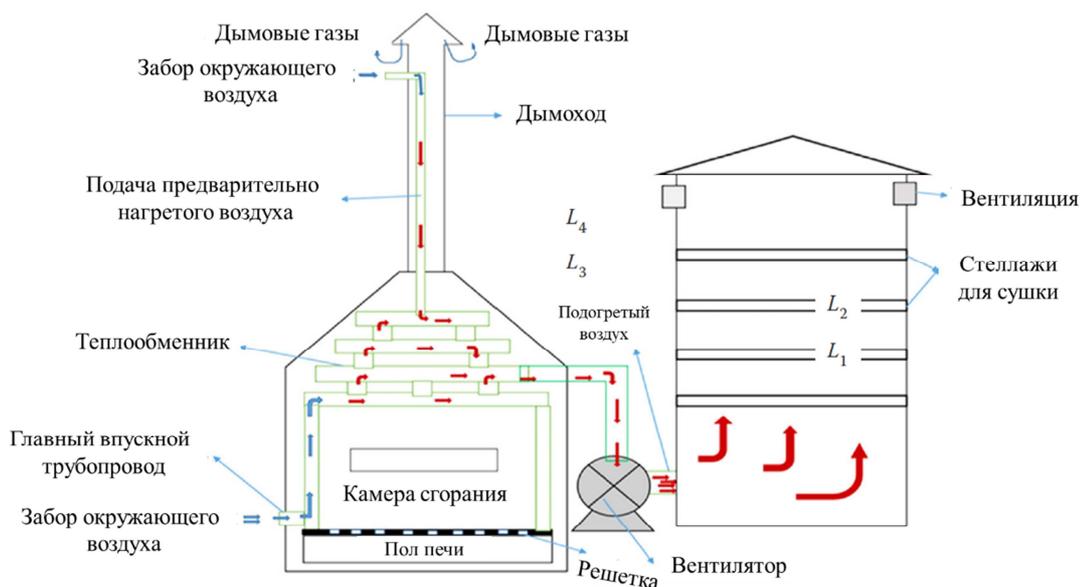


Рисунок 2 – Схема гибридной сушилки с указанием направления потока горячего воздуха

Коэффициент влажности ( $K$ ), рассчитанный на основании содержания влаги ( $W$ ) зерна кукурузы во время процесса сушки, можно рассчитать по формуле:

$$K = \frac{W_t - W_e}{W_o - W_e} \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент влажности;  $W_t$  – влажность в определенный момент времени;  $W_e$  – оптимальная влажность в пересчете на сухое вещество;  $W_o$  – начальная влажность в пересчете на сухое вещество.

**Результаты исследования.** Влияние температуры сушки на изменение влажности во времени: для расчета использовали кукурузу с исходным средним содержанием влаги 19 % [4, 5]. На изменение влажности зерна в процессе сушки на разных уровнях ( $L_1$ – $L_4$ ) влияет температура сушки, которая изменяется по возрастающей от нижнего ( $L_1$ ) до верхних уровней ( $L_2$ ,  $L_3$  и  $L_4$ ). В течение 7-часового периода сушки на уровне  $L_4$  достигается средняя температура 45 °С, на уровне  $L_3$  – 43 °С,  $L_2$  – 42 °С и  $L_1$  – 38 °С. Для сравнения, средняя температура окружающей среды (26 °С) на 15 °С ниже, чем общая средняя температура (41 °С), создаваемая внутри сушилки.

ки.

Высокую температуру внутри сушилки, по сравнению с температурой окружающего воздуха, можно обеспечить прозрачным материалом (плексигласом) для покрытия сушильной камеры. Материал из плексигласа позволяет поглощать солнечную энергию вследствие прямого солнечного излучения и способен предотвращать утечку тепла, действуя как тепловая ловушка для инфракрасного (теплого) излучения, тем самым ограничивая перемещение нагретого воздуха. Также, увеличение температуры от уровня  $L_1$  до  $L_4$  в сушилке связано с различиями в плотности воздуха из-за эффекта плавучести, который вызывает расслоение горячего и более холодного воздуха. Дополнительное тепло от сжигания биомассы в печи также способствует тенденции к повышению температуры в сушилке по сравнению с температурой окружающей среды. Подобные результаты наблюдаются при сушке кукурузы в туннельной солнечной сушилке.

Изменение содержания влаги в зависимости от времени сушки на разных уровнях (от  $L_1$  до  $L_4$ ) представлено на рис. 3. При более высокой температуре сушки зерна на уровне  $L_4$  достигается снижение содержания влаги  $W=13\%$  за 3 часа, на уровне  $L_3$  через 4 часа,  $L_2$  через 5 часов и  $L_1$  через 7 часов. Для сравнения показано, что сушка на открытом солнце, позволяет достичь результата влажности  $13\%$  после 15 часов сушки. В среднем, для сушки зерна кукурузы с  $19$  до  $13\%$  в гибридной сушилке требуется 5 часов, в результате чего средняя скорость сушки составит  $1,2\% \cdot \text{час}$  по сравнению с  $0,4\% \cdot \text{час}$  для зерна, высушенного на открытом солнце. Прогнозирование процесса сушки кукурузы в сушилке было выполнено на основе многомерного регрессионного анализа данных в программе MATLAB.

Сушка зерен, в основном, происходит в период снижения скорости, который включает удаление влаги из зерен кукурузы за счет процесса диффузии, при котором влага изнутри переносится к поверхности зерен.

Этот механизм диффузии лучше всего описывается вторым законом диффузии Фика. На эффективный коэффициент диффузии влаги, являющийся результатом этого явления, влияет температура. Чем выше температура сушки, тем выше скорость диффузии влаги из внутренних областей к поверхности [6].

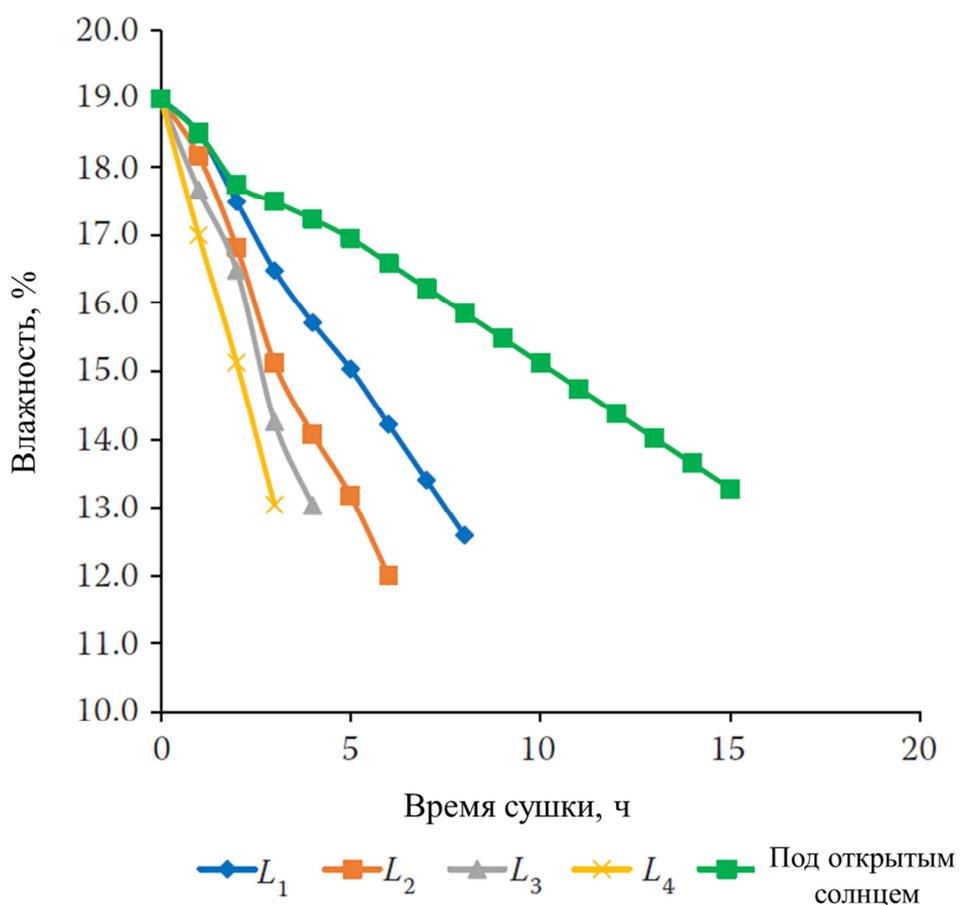


Рисунок 3 – Изменение содержания влаги в зависимости от времени сушки: L<sub>1</sub>-L<sub>4</sub> – уровни сушки

Эффективный коэффициент диффузии влаги (рис. 4) увеличивается по уровням со значениями  $1,45 \times 10^{-11} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  и  $3,10 \times 10^{-11} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  для зерен, высушенных на L<sub>1</sub> и L<sub>4</sub> соответственно. Более высокий коэффициент диффузии влаги обусловлен высокими температурами сушки в гибридной сушилке, что поспособствовало повышенному колебательному движению молекул воды в зернах кукурузы и привело к высокому градиенту влажно-

сти и массопереносу между ними зернами и воздухом. Эффективный коэффициент диффузии влаги для зерна кукурузы находится в допустимом диапазоне (от  $10^{-12}$  до  $10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ) для сушки подобных биологических материалов.

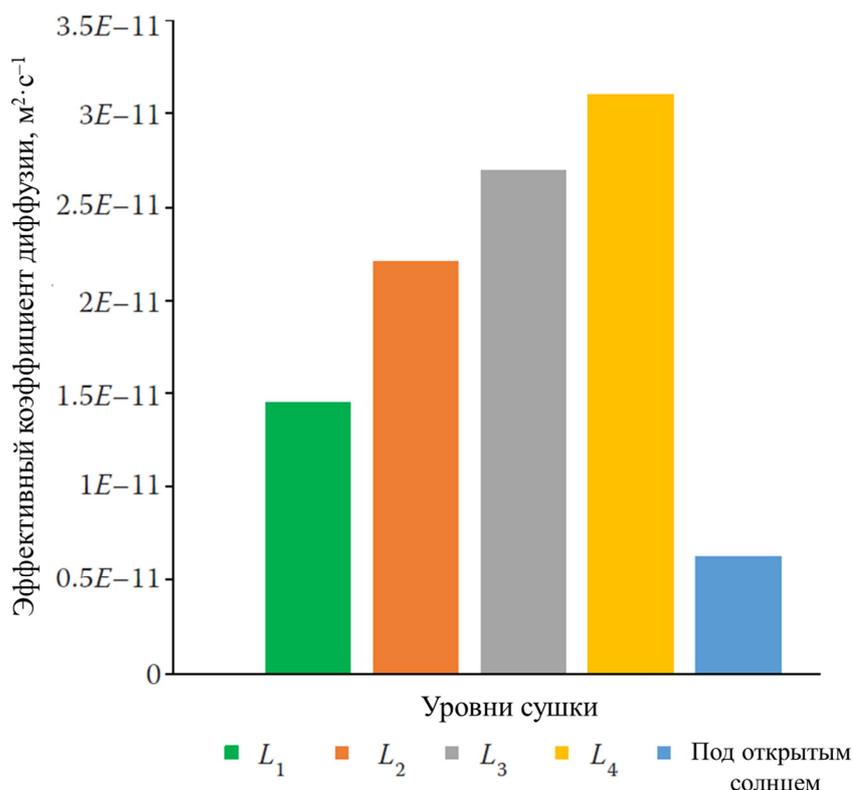


Рисунок 4 – Влияние уровней сушки на эффективный коэффициент диффузии влаги:  $L_1$ - $L_4$  – уровни сушки; E – экспонента

Энергия активации кукурузы, высушенной в мобильной гибридной сушилке, составит  $96,83 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ . Это находится в допустимом пределе для большинства сельскохозяйственных продовольственных культур ( $12,7$ – $110 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ).

**Выводы.** Рассмотренная гибридная сушилка, работающая на биомассе и солнечной энергии, позволяет сократить время сушки зерна и имеет достаточно высокую производительность, особенно в период пасмурной погоды, что позволяет использовать ее в качестве одного из вариантов сушки для малых фермерских хозяйств.

### Список литературы

1. Ильин М.А. Солнечные сушилки // В сборнике: сборник студенческих научных работ по материалам докладов, 72-й Международной студенческой научно-практической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения А.Г. Дояренко. 2019. С. 39-41.
2. Веселова Н.М., Нехорошев Д.Д., Меликов А.В. Энергетическая установка для сушки зерна за счет средств солнечной энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 8-3 (62). С. 39-42.
3. Кирпа Н.Я. Инновационные энергосберегающие технологии сушки семян кукурузы // Хранение и переработка зерна. 2014. № 4 (181). С. 31-34.
4. Шакир Е.К., Беляев Е.К., Моханрадж М. Численное моделирование солнечной сушилки с тепловым насосом для континентального климата // Научно-практические исследования. 2020. № 5-2 (28). С. 254-260.
5. Грунтович Н.В., Жеранов С.А. Влияние влажности зерна и кукурузы на энергетические затраты при его сушке // В сборнике: Проблемы энергообеспечения, информатизации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК. Под общей редакцией Маркарянц Л.М., 2014. С. 81-84.
6. Тюрин И.Ю., Хитрова Н.В., Юлдашев В.Ю. Режимы сушки кукурузы // В сборнике: Наука и образование: достижения и перспективы. Материалы II Международной научно-практической конференции. 2019. С. 233-236.

### References

1. Il'in M.A. Solnechnye sushilki // V sbornike: sbornik studencheskih nauchnyh rabot. po materialam dokladov, 72-j Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 145-letiyu so dnya rozhdennii A.G. Do-yarenko. 2019. S. 39-41.
2. Veselova N.M., Nekhoroshev D.D., Melikov A.V. Energeticheskaya ustanovka dlya sushki zerna za schet sredstv solnechnoj energii // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2017. № 8-3 (62). S. 39-42.
3. Kirpa N.YA. Innovacionnye energosberegayushchie tekhnologii sushki semyan kukuruzy // Hranenie i pererabotka zerna. 2014. № 4 (181). S. 31-34.
4. SHakir E.K., Belyaev E.K., Mohanradzh M. CHislennoe modelirovanie solnechnoj sushilki s teplovym nasosom dlya kontinental'nogo klimata // Nauchno-prakticheskie issledovaniya. 2020. № 5-2 (28). S. 254-260.
5. Gruntovich N.V., ZHeranov S.A. Vliyanie vlazhnosti zerna i kukuruzy na energeticheskie zatraty pri ego sushke // V sbornike: Problemy energoobespecheniya, informatizacii i avtomatizacii, bezopasnosti i prirodo-pol'zovaniya v APK. Pod obshchej redakciej Markaryanc L.M., 2014. S. 81-84.
6. Tyurin I.YU., Hitrova N.V., YUldashev V.YU. Rezhimy sushki kukuruzy // V sbor-nike: Nauka i obrazovanie: dostizheniya i perspektivy. Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. S. 233-236.