ГЕЛИОКОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ТЫКВЕННЫХ СЕМЯН КАК ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В УСЛОВИЯХ УЗБЕКИСТАНА

Якубов М., Хаитов Р.А.
Бухарский государственный технический университет. Бухара. Узбекистан.

Qabul qilindi: 29.10.2026
Ko‘rib chiqildi: 30.10.2026
Tasdiqlandi: 31.10.2026

Ключевые слова: гелиоконвективная сушка, солнечная энергия, семена тыквы, энергосбережение, тепловой аккумулятор, вакуумная упаковка.

Аннотация. Проанализирована энергетическая эффективность гелиоконвективной сушки тыквенных семян при 38–40 °C по патенту UZ IAP 07182. Расчёт показал, что нагрев воздуха до 40 °C требует на 60 % меньше теплоты, чем нагрев до 60–65 °C, применяемый в прототипе. С учётом 2500–3000 солнечных часов в год в Узбекистане и средней эффективности солнечных сушилок 60–77 % этот режим может быть полностью обеспечен солнечной энергией. Рассмотрены ограничения метода и пути повышения его производительности.

Актуальность. Сушка — одна из самых энергоёмких операций переработки сельскохозяйственного сырья. Для семян тыквы она особенно важна, так как от режима сушки зависит сохранность витаминов и антиоксидантов. В известных способах семена сушат при 50–80 °C, а в прототипе — при 60–65 °C с последующей обжаркой при 160–180 °C [1]. В патенте UZ IAP 07182 обе стадии сушки проводят в гелиоконвективной сушилке при 38–40 °C, а сам процесс характеризуется как энергосберегающий [1].

Энергетический анализ. Теплота, необходимая для нагрева 1 кг сушильного агента (воздуха) от температуры окружающей среды t_0 до температуры сушки t, равна:

$$q = c_p\,(t - t_0)$$

где $c_p \approx 1{,}005$ кДж/(кг·К) — удельная теплоёмкость воздуха. Результаты расчёта для $t_0 = 25$ °C приведены в таблице 1.

Таблица 1. Удельная теплота нагрева воздуха при разных режимах сушки ($t_0 = 25$ °C)

Режим	t, °C	q, кДж/кг воздуха	Снижение по сравнению с режимом, %
UZ IAP 07182	40	15,1	–

Режим	t, °C	q, кДж/кг воздуха	Снижение по сравнению с режимом, %
Прототип RU 2286678	62,5 (60–65)	37,7	60
Аналог RU 2170027	70 (60–80)	45,2	67

Таким образом, при равном расходе воздуха предлагаемый режим требует на 60–67 % меньше теплоты на нагрев. Нагрев воздуха всего на 15 К выше температуры окружающей среды, как правило, обеспечивается даже простым плоским солнечным воздушным коллектором.

Следует учитывать и обратную сторону низкотемпературного режима — увеличение продолжительности сушки. При сушке тыквы вместе с семенами при 40 °C процесс длился 98,6 ч, при 60 °C — 81 ч, при 80 °C — 33,5 ч [2]. Однако при использовании солнечной энергии более длительная сушка не требует дополнительного топлива, поэтому выигрыш в качестве достигается без роста энергозатрат.

Солнечный ресурс и эффективность сушилок. Узбекистан получает в среднем 2500–3000 солнечных часов в год [3]. По данным обзора 2024 г., средний КПД солнечных сушилок с естественной конвекцией составляет 59,7 %, с принудительной — 67,7 %, с интеграцией теплового насоса — 77,5 % [4]. Солнечные сушилки существенно сокращают продолжительность сушки по сравнению с открытой сушкой на солнце: например, сушка перца в крупной теплице с аккумулятором фазового перехода заняла 2,5 сут вместо 11 сут [4]. Гелиоконвективная сушилка с принудительной циркуляцией воздуха, предусмотренная патентом, соответствует наиболее распространённому и экономичному типу.

Пути повышения производительности. Основной недостаток солнечной сушки — зависимость от погоды и суточного цикла. Для стабилизации режима 38–40 °C целесообразно:

1. применять тепловые аккумуляторы с фазовым переходом, продлевающие сушку в вечерние часы [4];
2. оснащать сушилку резервным электронагревателем с терморегулятором, ограничивающим температуру 40 °C;
3. использовать вскрытие оболочки (надрез 2–3 мм и трещины), которое облегчает выход влаги из семени [1].

Высушенный до 5–6 % продукт упаковывают в вакуумно-упаковочный материал, исключающий доступ влаги и кислорода [1]. Это закрепляет энергетический эффект сушки: продукт не набирает влагу при хранении и не требует повторной обработки.

4. Режим сушки 38–40 °C по патенту UZ IAP 07182 требует на 60–67 % меньше теплоты на нагрев воздуха, чем режимы 60–80 °C известных способов.

5. Благодаря 2500–3000 солнечным часам в год и КПД солнечных сушилок 60–77 % этот режим в условиях Узбекистана может обеспечиваться преимущественно солнечной энергией.

6. Увеличение продолжительности сушки при низкой температуре компенсируется бесплатным солнечным теплом; для стабилизации процесса рекомендуется применять тепловые аккумуляторы и резервный нагрев с ограничением температуры.

Литература

1. Астанов С., Турдиев М.Р., Ёкубов М.Э., Касимова Г.К. Способ получения семян тыквы со вскрытой оболочкой для пищевой промышленности и медицины. Патент UZ IAP 07182. – 30.12.2022, Бюл. № 12-2.
2. Koziorzębska A., Łozicki A., Rygało-Galewska A., Zglińska K. Effect of drying temperature of Ambar pumpkin on proximate composition and content of bioactive ingredients // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13(14). – 8302. DOI: 10.3390/app13148302
3. Tursunov S. Does wheat yield depend on variety and planting time? // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 258. – 04033. DOI: 10.1051/e3sconf/202125804033
4. Venkateswarlu K., Reddy S.V.K. Recent trends on energy-efficient solar dryers for food and agricultural products drying: a review // Waste Disposal & Sustainable Energy. – 2024. DOI: 10.1007/s42768-024-00193-3