

DOI 10.25741/2413-287X-2022-01-2-160

УДК: 664.723.047

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ КРИТЕРИЕВ ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ЗЕРНА

В. СОРОЧИНСКИЙ, ВНИИЗ – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

E-mail: vlafest@bk.ru

Приведены результаты исследований изменения тепло-массообменных критериев Кирпичева, Коссовича и Ребиндера при сушке зерна. Разработана методика расчета критериев по экспериментальным данным полей влагосодержания и температуры. Установлены зависимости критериев от начальной влажности зерна, скорости фильтрации и температуры агента сушки, продолжительности сушки. Получены расчетные уравнения регрессии в диапазоне начальной влажности зерна 21,1–40,7%, температуры агента сушки 35–70 °С и скорости его фильтрации 0,3–1,0 м/с для критериев Кирпичева, Коссовича и Ребиндера.

Ключевые слова: зерно, агент сушки, качество, влажность, критерии, скорость фильтрации, тепломассообмен, температура, уравнения.

Одними из основных критериев, определяющих эффективность конвективной сушки и сохранение качества высушиваемого материала, являются тепломассообменные критерии Кирпичева, Коссовича и Ребиндера [1]. В процессе сушки зерновых культур, подверженных трещинообразованию (рис, кукуруза, соя и другие бобовые), может наблюдаться ухудшение их качества. Процесс трещинообразования характеризуется массообменным критерием Кирпичева (Ki_m), или технологическим критерием. Он устанавливает отношение интенсивности испарения влаги с поверхности зерновки к градиенту влагосодержания, определяющего подвод влаги из центра к поверхности. Для параболического распределения влагосодержания в зерновке критерий можно вычислить по уравнению [2]:

$$Ki_m = q_m R_v / a_m \rho_o u_o = 2(u_{ц} - u_{пов}) / u_o, \quad (1)$$

где q_m — интенсивность испарения влаги с поверхности зерновки, кг / (м²·ч);

R_v — определяющий размер зерновки, м;

a_m — коэффициент диффузии влаги, м² / ч;

ρ_o — плотность сухого вещества зерновки, кг / м³;

u_o — начальное влагосодержание зерновки, кг H₂O / кг с.в.;

$u_{ц}, u_{пов}$ — влагосодержание в центре и на поверхности образца, кг H₂O / кг с.в.

The patterns of the alteration of heat-mass exchange criteria of Kirpichev, Kossovich, and Rebinder during the drying of the grain were studied. The algorithm for the calculation of the criteria on the basis of the data on moisture content and temperature was developed. The effects of initial moisture content in the grain, filtration speed, temperature of drying agent, and duration of drying on the criteria were determined. The regression equations were proposed allowing calculation of the criteria of Kirpichev, Kossovich, and Rebinder for the ranges of initial moisture 21.1–40.7%, drying agent temperature 35–70 °C, and filtration speed 0.3–1.0 m / s.

Keywords: grain, drying agent, quality, humidity, criteria, speed filter, heat, temperature, equation.

В период постоянной скорости сушки массообменный критерий Кирпичева зависит от температуры, относительной влажности и скорости агента сушки и не зависит от продолжительности этого периода. В период падающей скорости сушки критерий Кирпичева изменяется во времени, так как поток удаляемой влаги, а также коэффициент диффузии влаги уменьшаются. Что касается отдельной зерновки, то ввиду ее малых размеров и относительно незначительной влажности период постоянной скорости сушки практически отсутствует, изменение критерия Кирпичева будет определяться изменением влагосодержания между центром и поверхностью зерновки.

В ранее действовавшей инструкции по сушке зерна различных культур (1982) были установлены высшие пределы температуры агента сушки и нагрева зерна различной начальной влажности, которые изменяются в процессе сушки [3]. При этом критерий Кирпичева прямо пропорционален интенсивности сушки и обратно пропорционален коэффициенту диффузии влаги.

Исследование зависимости критерия Кирпичева от начальной влажности зерна, температуры его нагрева, температуры агента сушки и скорости его фильтрации позволит совершенствовать режимы сушки зерна и конструкции зерносушилок.

Эффективность процесса сушки также можно оценить по критерию Коссовича (Ko), характеризующему отношение количества теплоты, затраченной на испарение влаги из зерна, к количеству теплоты, пошедшей на его нагрев:

$$Ko = r\Delta u / c_q \Delta T, \quad (2)$$

где r — удельная теплота испарения влаги, кДж/кг;
 Δu — разность влагосодержания зерна, кг/кг;
 c_q — удельная теплоемкость влажного зерна, кДж/кг·К;
 ΔT — разность конечной и начальной температур зерна, К.

С увеличением продолжительности сушки значения критерия Коссовича возрастают, так как снижается доля первоначальных затрат теплоты на нагрев зерна из общих затрат теплоты на сушку.

В отличие от критерия Коссовича, критерий Ребиндера (Rb) при сушке характеризует отношение количества теплоты, затраченной на нагрев зерна, к количеству теплоты, затраченной на испарение из зерна влаги за бесконечно малый промежуток времени:

$$Rb = c_q \Delta T / r \Delta u. \quad (3)$$

По определению: чем меньше значение критерия Ребиндера, тем эффективнее процесс сушки.

Таким образом, знание критерия Кирпичева применяется для определения температурных режимов сушки для предотвращения трещинообразования зерна, а величины критериев Коссовича и Ребиндера — для оценки эффективности процесса сушки по соотношению затрат теплоты на испарение влаги и на нагрев зерна.

Цель исследования — изучение зависимости критериев Кирпичева, Коссовича и Ребиндера от начальной влажности и температуры зерна, температуры и скорости фильтрации агента сушки применительно к сушке зернобобовых культур и других зерновых культур, подверженных образованию трещин при сушке, для обеспечения и сохранения их качества и снижения энергопотребления при сушке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящее исследование является продолжением ранее проведенных исследований полей влагосодержания и температуры на модельном теле зерновки нута для увеличения области определения и получения новых расчетных зависимостей. Сведения об экспериментальной установке, объектах и методах исследования приведены в источнике [4]. Значения критериев Кирпичева, Коссовича и Ребиндера рассчитывались с применением результатов ранее проведенных и новых экспериментальных исследований. При определении критерия Коссовича использовалось значение температуры зерновки, измеренной медь-константановыми термопарами в течение первых 10 мин сушки. Температуру центра зерновки рассчитывали по уравнению:

$$\Theta = 0,914\tau - 0,267W_n + 0,898t_{a.c.} + 5,67V_\phi - 5,15, \quad (4)$$

$$R^2 = 0,9832,$$

где W_n — начальная влажность зерновки;
 $t_{a.c.}$ — температура агента сушки;
 V_ϕ — скорость фильтрации агента сушки;
 τ — время сушки.

Исследования проведены на зерновках нута при начальной влажности зерна $W_n = 18,9–40,7\%$, температуре агента сушки $t_{a.c.} = 35, 50$ и 70°C , скорости его фильтрации $V_\phi = 0,3–1,0$ м/с. При этом в указанном диапазоне параметров температура зерновки через 10 мин практически сравнялась с температурой агента сушки. Продолжительность сушки составляла до 240 мин в зависимости от параметров зерна и агента сушки. Теплоемкость зерновки определяли по уравнению [2]:

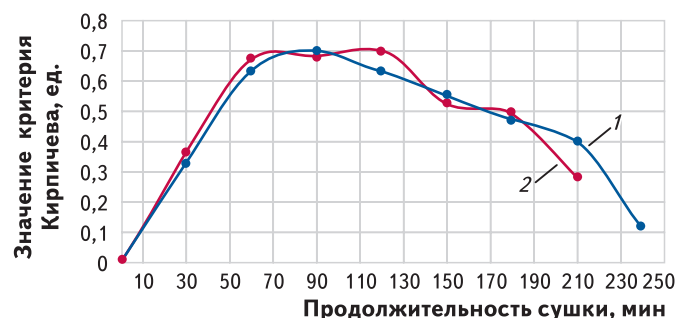
$$C = 1,08 + 0,0184W_c + 0,0117\Theta, \quad (5)$$

где W_c — влажность зерна, %.

В отличие от критерия Коссовича, критерий Ребиндера определялся по приращению изменения температуры и влажности зерна в процессе сушки, рассчитанному через каждую минуту в течение первых 10 мин. Удельная теплота испарения влаги при этом была принята одинаковой и составляла 2514 кДж/кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что для высоковлажной зерновки скорость фильтрации агента сушки при определении критерия Кирпичева не играет существенной роли (рис. 1).



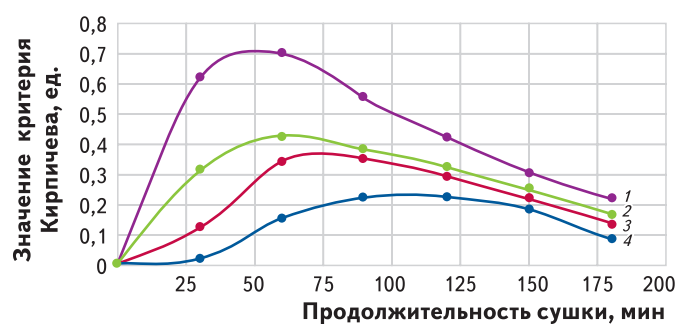
Кривая	$W_n, \%$	$t_{a.c.}, ^\circ\text{C}$	$V_\phi, \text{м/с}$
1	38,7	35	0,3
2	40,7		1,0

Рис. 1. Изменение значений критерия Кирпичева при разных скорости фильтрации агента сушки и начальной влажности зерна

При примерно одинаковой начальной влажности зерна значения массообменного критерия Кирпичева при одинаковой продолжительности сушки близки друг к другу. С увеличением продолжительности сушки и снижением влажности зерна это значение вначале увеличивается

вследствие снижения коэффициента диффузии влаги, а затем уменьшается вследствие снижения общего потока испаряемой влаги и уменьшения разницы во влажосодержании между центром и поверхностью зерновки. Установлено, что при высокой начальной влажности (38,7–40,7%) время достижения максимального значения критерия Кирпичева ($Ki_m(\max) = 0,65-0,70$) составляет 70–90 мин, что свидетельствует об увеличении разницы во влажосодержании между центром и поверхностью зерновки и наибольшей опасности трещинообразования зерна.

На величину максимального массообменного критерия Кирпичева и на время его наступления существенное влияние оказывает влажность зерна (рис. 2).



Кривая	$W_n, \%$	$t_{a.c}, ^\circ\text{C}$	$V_\phi, \text{м/с}$
1	36,2	50	0,5
2	30,8		
3	22,3		
4	18,9		

Рис. 2. Изменение значений критерия Кирпичева при разной начальной влажности зерна

При скорости фильтрации агента сушки 0,5 м/с, его температуре 50 °С и начальной влажности зерна от 18,9 до 36,2% максимальное значение массообменного критерия Кирпичева изменяется соответственно от 0,25 до 0,70, время его наступления сокращается со 105 до 70 мин, то есть происходит смещение максимального значения критерия к началу процесса сушки.

Температура агента сушки, определяющая температуру нагрева зерна, также влияет на время наступления максимального значения массообменного критерия Кирпичева — с ее ростом это значение существенно уменьшается и быстрее наступает опасность трещинообразования (рис. 3).

Для расчета максимального значения массообменного критерия Кирпичева получено уравнение регрессии:

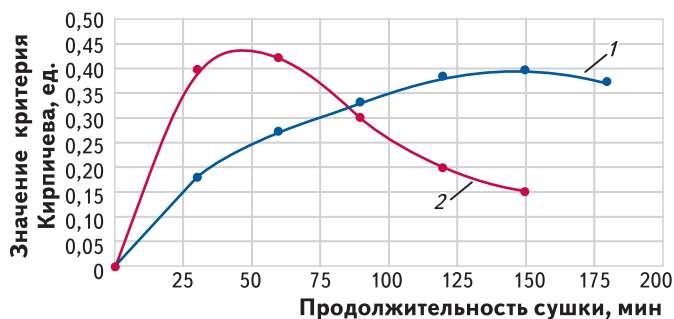
$$Ki_m(\max) = 0,012W_n + 0,011t_{a.c.} + 0,65V_\phi - 0,83, \quad (6)$$

$$R^2 = 0,9661,$$

$$\text{где } W_n = 21,7-30,8\%,$$

$$t_{a.c.} = 35-70^\circ\text{C},$$

$$V_\phi = 0,3-1,0 \text{ м/с}.$$



Кривая	$W_n, \%$	$t_{a.c}, ^\circ\text{C}$	$V_\phi, \text{м/с}$
1	23,6	35	0,3
2	21,7	70	

Рис. 3. Изменение значений критерия Кирпичева при разных температуре агента сушки и начальной влажности зерна

При этом температура нагрева зерна принята равной температуре агента сушки.

Увеличение максимального значения критерия Кирпичева с ростом влажности зерна, температуры и скорости фильтрации агента сушки связано с увеличением интенсивности испарения влаги и градиента влажосодержания между центром и поверхностью зерновки.

Для расчета времени достижения максимального значения массообменного критерия Кирпичева также получено уравнение:

$$\tau_{\max} = 239,8 - 1,98W_n - 1,51t_{a.c.} - 44V_\phi, \text{ мин}, \quad (7)$$

$$R^2 = 0,9155,$$

$$\text{где } W_n = 18,9-40,7\%;$$

$$t_{a.c.} = 35-70^\circ\text{C};$$

$$V_\phi = 0,3-1,0 \text{ м/с}.$$

Как видно из уравнения (7), τ_{\max} уменьшается как с ростом начальной влажности зерна, так и с ростом температуры и скорости фильтрации агента сушки, то есть опасность трещинообразования наступает раньше. Следует отметить существенное влияние скорости агента сушки на достижение максимального значения критерия Кирпичева. Для предотвращения этого негативного явления «для каждого продукта опытным путем устанавливается область допустимых градиентов, то есть область таких режимных параметров, при которых гарантируется сушка изделий с градиентами влажности не выше допустимых» [2]. Такая область определена и для сушки зернобобовых культур: например, при влажности зерна до 20% предельная температура его нагрева в шахтных прямоточных зерносушилках составляет 40 °С [3]. Используя уравнения (2) и (3) и принимая температуру агента сушки, равной температуре нагрева зерна, при скорости фильтрации в слое зерна 0,5 м/с, характерной для шахтных зерносушилок, максимальное значение критерия Кирпичева будет составлять 0,175, а время его наступления — 118 мин.

Для оценки эффективности процесса сушки исследована зависимость **критерия Коссовича** от начальной влажности зерна, температуры агента сушки и скорости его фильтрации. Установлено, что чем выше начальная влажность зерна, тем выше значение критерия Коссовича, так как увеличиваются затраты теплоты на испарение влаги (рис. 4). При этом увеличение температуры агента сушки приводит к уменьшению этого значения вследствие увеличения затрат на нагрев зерна. Таким образом, с точки зрения энергетических затрат, исходя из значения критерия Коссовича, наиболее эффективна низкотемпературная сушка зерна. Однако она не всегда возможна из-за низкой производительности, связанной с длительностью процесса, что может привести к ухудшению качества высоковлажного зерна по причине активизации биохимических процессов.

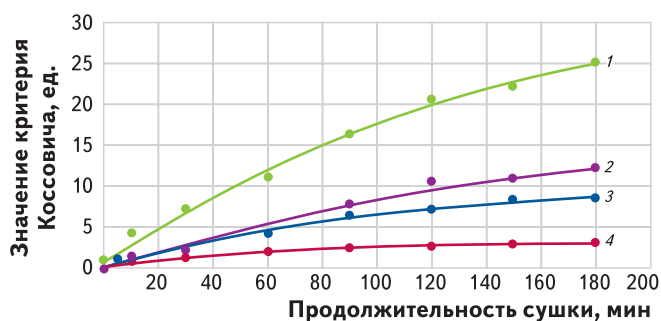


Рис. 4. Изменение значений критерия Коссовича при разных температуре агента сушки и начальной влажности зерна

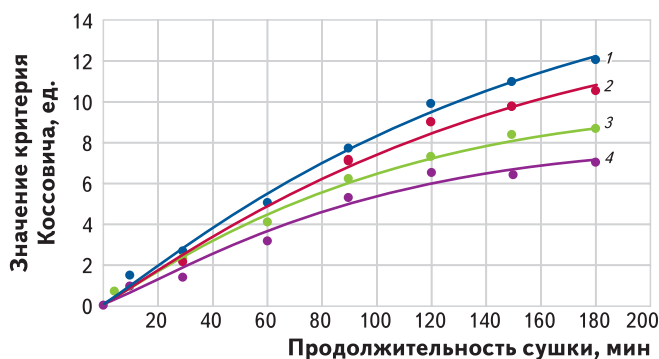


Рис. 5. Изменение значений критерия Коссовича при разных скорости фильтрации агента сушки и начальной влажности зерна

С ростом скорости фильтрации агента сушки значение критерия Коссовича несколько уменьшается, так как увеличиваются скорость нагрева зерна и количество теплоты, израсходованной на его нагрев. При этом чем выше начальная влажность зерна, тем выше значение критерия, при прочих равных условиях. Во всех случаях с увеличением продолжительности сушки критерий Ко растет, так как увеличивается количество испаренной влаги при уже нагретом зерне. По мере высушивания зерна темпы этого роста снижаются из-за уменьшения количества испаренной влаги.

Полученные экспериментальные данные обобщены уравнением регрессии, позволяющим рассчитать значение критерия Коссовича в зависимости от параметров и продолжительности сушки:

$$K_o = 0,675W_n - 0,26t_{a.c} + 5,02V_{\phi} + 0,11\tau - 10,7, \quad (8)$$

$$R^2 = 0,9227,$$

$$\text{где } W_n = 21,1 - 40,7\%;$$

$$t_{a.c} = 35 - 70^\circ\text{C};$$

$$V_{\phi} = 0,3 - 1,0 \text{ м/с};$$

$$\tau = 1 - 180 \text{ мин.}$$

Как следует из уравнения (8) и области определения показателей, наибольшее влияние на увеличение значения критерия Коссовича оказывает повышенная влажность зерна. Также значение критерия незначительно увеличивается в процессе сушки и с увеличением скорости фильтрации агента сушки. Оно несколько уменьшается с ростом температуры агента сушки за счет расходования теплоты на нагрев зерна. Однако при различных значениях параметров уже через 3–8 мин значение Ко превышает единицу, что свидетельствует о том, что зерно прогрелось и в дальнейшем подведенная теплота пойдет на испарение влаги.

Значение **критерия Ребиндера**, являясь важной характеристикой кинетики процесса сушки, определяет соотношение локальных значений затрат теплоты на нагрев материала и на испарение влаги, оно также зависит от режимов сушки (рис. 6).



Рис. 6. Изменение критерия Ребиндера при разной начальной влажности зерна

Критерий Ребиндера резко снижается в первые 1–2 мин сушки, так как в это время происходит интенсивный нагрев зерновки, причем его значение при высокой начальной влажности зерновки уменьшается вследствие увеличения затрат теплоты на испарение влаги. В дальнейшем ($\tau = 3\text{--}10$ мин) значение R_b стабилизируется в периоде постоянной скорости сушки. Однако по определению оно должно уменьшаться по мере высушивания зерна и при условии недопущения его перегрева.

Для этого периода значение критерия Ребиндера можно определить по уравнению регрессии:

$$R_b = 1,44 - 0,019W_n - 0,0074t_{a.c.} - 0,21V_\phi, \quad (9)$$

$$R^2 = 0,9744,$$

$$\text{где } W_n = 21,1\text{--}40,7\%;$$

$$t_{a.c.} = 35\text{--}70^\circ\text{C};$$

$$V_\phi = 0,3\text{--}1,0 \text{ м/с}.$$

Критерий Ребиндера уменьшается при высокой начальной влажности зерна, росте температуры и скорости фильтрации агента сушки, что свидетельствует о повышении интенсификации процесса, то есть затраты теплоты на испарение влаги в каждый момент времени превышают затраты теплоты на нагрев зерна. В то же время критерий Коссовича увеличивается при высокой начальной влажности зерна и росте скорости фильтрации агента сушки, а с ростом температуры агента сушки он уменьшается,

что в целом характеризует процесс сушки, в том числе его экономическую составляющую.

В заключение следует отметить, что результаты данного исследования могут служить основанием для разработки режимов сушки зерна, прежде всего подверженного трещинообразованию, и для определения направлений интенсификации процесса сушки в конвективных зерносушилках (шахтных прямоточных и рециркуляционных) при их проектировании, что позволит снизить энергозатраты и сохранить качество высушиваемого зерна.

Литература

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. — М. : Энергия, 1968. — 473 с.
2. Гинзбург, А. С. Технология сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. — М. : Пищевая промышленность, 1976. — 248 с.
3. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, маслосемян и эксплуатации зерносушилок № 9-3-82. — М. : ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1982. — 61 с.
4. Сорочинский, В. Ф. Изменение полей влагосодержания и температуры в зерне при сушке / В. Ф. Сорочинский, А. Л. Доггадин // Хранение и переработка сельхозсырья. — 2019. — № 1. — С. 47–56.
5. Сорочинский, В. Ф. Снижение расхода топлива в прямоточных зерносушилках / В. Ф. Сорочинский // Комбикорма. — 2007. — № 7. — С. 51–52. ■