

УДК 664.78:536.24

## Обоснование использования перегретого пара для гидротермической обработки зерна крупяных культур

**А.А. Румянцев**<sup>1</sup>, канд. техн. наук; **М.М. Константинов**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, профессор;  
**Н.А. Борзов**<sup>3</sup>, инженер; **Г.П. Юхин**<sup>4</sup>, д-р техн. наук, профессор

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

<sup>3</sup> ТОО «Казагроэксперт»

<sup>4</sup> ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

В статье предложено для гидротермической обработки (ГТО) зерна крупяных культур (гречихи) перед его шелушением использовать в качестве тепло- и влагоносителя перегретый пар с невысокой степенью перегретости. Такая обработка представляется непрерывным процессом перехода стадии прогрева и увлажнения зерна конденсирующимся на его поверхности паром в стадию сушки с постоянной скоростью. При использовании пара небольшой перегретости  $\Delta T = 10-15$  К и завершении ГТО с подсушиванием зерна до влажности 16–17 % обеспечивается возможность последующей сушки до нормированного влагосодержания в автономной сушилке за один проход, что является оптимальным для этой операции. При перегретости пара  $\Delta T = 20-30$  К и длительности ГТО 8,5–12,5 мин. процесс предварительной обработки можно считать завершённым, а зерно – подготовленным к его дальнейшему шелушению. В рассмотренных случаях переработанное зерно имело удовлетворительные технологические показатели: коэффициент шелушения –  $K_{ш} = 58-67$  %, коэффициент целостности ядра –  $K_{ця} = 62-66$  %, коэффициент эффективности шелушения –  $K_{эш} = 60-66$  %.

*Ключевые слова:* обработка, зерно, перегретый пар, сушка, влагосодержание.

Гидротермическая обработка (ГТО) зерна крупяных культур, в том числе гречихи, включает его пропаривание насыщенным паром избыточного давления из магистрали или вырабатываемым парогенератором. При этом происходит интенсивное увлажнение и монолитизация ядра с дальнейшим его укреплением после сушки обычно горячим воздухом в автономной сушилке, что в значительной мере повышает эффективность последующего шелушения.

В условиях фермерских хозяйств для этих целей нами предложена многофункциональная установка ёмкостного типа, совмещающая функции парогенератора, пропаривателя и сушилки [1]. При этом парообразование происходит вскипанием подаваемой на рабочую поверхность разогретого до нужной температуры дна тонко распыляемой воды, а зерно, поданное на ту же поверхность, перемешивается лопастной мешал-

кой. Давление пара в рабочей камере в сочетании с температурой генерируемого пара определяет его состояние, которое может быть насыщенным или перегретым. В последнем случае температура пара должна превышать температуру насыщения при заданном давлении, поддерживаемым клапаном, сбрасывающим избытки пара в атмосферу. При этом перемешиваемый слой зерна пронизывается потоком генерируемого пара.

Перегретый пар используется, как правило, в качестве агента сушки, который может быть более эффективным чем воздух. Так, многими исследователями обосновывается применение перегретого пара атмосферного давления для сушки варёных круп, при этом перегрев пара  $\Delta T < 40$  К не рассматривается, а начальный период прогрева сопровождается процессом доувлажнения, обусловленным конденсацией пара на поверхности крупы [2].

Учитывая вышеизложенное, нами предложено для предварительной обработки зерна гречихи перед его шелушением использовать в качестве тепло- и влагоносителя перегретый пар с невысокой степенью перегретости. В этом случае такая обработка представляется непрерывным процессом перехода стадии прогрева и увлажнения зерна конденсирующимся на его поверхности паром в стадию сушки с постоянной скоростью. Обе стадии сопровождаются процессом испарения влаги сначала с поверхности конденсатной плёнки, а затем с поверхности зерновок. Наличие избыточного давления пара интенсифицирует проникновение влаги внутрь зерновок и является фактором, компенсирующим некоторые потери влаги при частичном испарении конденсатной плёнки на первой стадии обработки, но препятствующим испарению влаги с поверхности зерновок на второй стадии.

**Цель исследования** – обоснование применения перегретого пара для гидротермической обработки зерна крупяных культур, преимущественно гречихи.

**Материал и методы исследования.** Для выполнения поставленной цели были применены: анализ научных работ в рассматриваемой и смежных областях, теория тепломассообмена, дифференциальные и интегральные исчисления, методология экспериментальных исследований.

Обработка и анализ данных результатов исследования проводились с помощью программ MathCAD-14 и Microsoft Office Excel 2010.

Для изучения предложенного способа ГТО зерна, реализуемого в разработанной нами установке, были проведены экспериментальные исследования, задаваемыми параметрами которых являлись: давление пара  $p = 0,3$  МПа (давление пара при традиционном способе пропаривания), температура пара  $T_n = 426, 436, 446, 456$ К (перегрев  $\Delta T = 10-40$  К при температуре насыщения  $T_s = 416$ К).

**Результаты исследования.** Рассмотрим кинетику влагосодержания зерна на первой стадии его обработки, полагая, что контактная передача тепла в этот период отсутствует, а вместо неё происходит непосредственное соприкосновение с греющей поверхностью конденсатной плёнки и её частичное вскипание с образованием дополнительного количества перегретого пара.

В общем виде текущее влагосодержание  $u_1(\tau)$ , кг/кг определяется уравнением:

$$u_1(\tau) = u_n + \Delta u(\tau) - u_{исп}(\tau), \quad (1)$$

где  $u_n$  – начальное влагосодержание зерна;

$\Delta u(\tau)$  – изменение избыточного влагосодержания зерна;

$u_{исп}(\tau)$  – изменение влагосодержания зерна, связанное с испарением конденсатной плёнки на его поверхности.

С учётом теплового баланса получим:

$$u_1(\tau) = u_n + \frac{c_3 \cdot \rho_{нз} \cdot [\bar{T}(\tau) - T_0]}{[c_{пн} \cdot (T_{пн} - T_s) + r] \cdot \rho_{пн}} - \frac{\alpha_k \cdot (T_{пн} - T_s) \cdot \tau}{r \cdot \rho_{сз} \cdot R_v}, \quad (2)$$

где  $c_3, c_{пн}$  – соответственно удельная теплоёмкость зерна и пара, Дж/кг·К;

$\rho_{нз}, \rho_{сз}, \rho_{пн}$  – соответственно насыпная плотность зерна, плотность сухого вещества зерна и плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;

$T_0, \bar{T}(\rho)$ , – соответственно начальная и текущая среднеобъёмная температуры зерновки, К;

$T_{пн}, T_s$  – соответственно температуры пара и насыщения при заданном давлении, К;

$\alpha_k$  – конвективный коэффициент теплоотдачи пара поверхности конденсатной плёнки, Дж/(м<sup>2</sup>·К·с);

$r$  – удельная теплота конденсации (испарения), Дж/кг;

$R_v$  – отношение объёма зерновки к площади её поверхности, м.

Среднеобъёмная температура зерновки (зерновка представлена шаром радиусом  $R$ , м, и объёмом, равным её объёму) вычисляется по формуле:

$$\bar{T}(\tau) = \frac{3}{R^3} \cdot \int_0^R r^2 \cdot T(r, \tau) dr, \quad (3)$$

где  $T(r, \tau)$  – температура зерновки на расстоянии  $r$ , м от её центра в момент времени  $\tau$ , с, является решением уравнения теплопроводности:

$$\frac{d[r \cdot T(r, \tau)]}{dr} = a \cdot \frac{d^2[r \cdot T(r, \tau)]}{dr^2}, \quad (4)$$

где  $\tau \geq 0, 0 \leq r \leq R$ ;

$a$  – коэффициент теплопроводности зерновки, м<sup>2</sup>/с;

при начальных и граничных условиях:

$$T(r, 0) = T_0, T(R, \tau) = T_s, \frac{dT(0, \tau)}{dr} = 0. \\ T(0, \tau) \neq \infty.$$

При этих условиях решение уравнения (4) имеет вид [3]:

$$\frac{T(r, \tau) - T_0}{T_s - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{R \cdot \text{Sin} \mu_n \cdot \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo). \quad (5)$$

Подставляя отсюда  $T(r, \tau)$  в (3), будем иметь:

$$\bar{T}(\tau) = T_s - (T_s - T_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo). \quad (6)$$

В последних двух уравнениях:

$Fo$  – критерий Фурье,  $Fo = (a \cdot \tau) / R^2$ ;

$\mu_n$  – корни характеристического уравнения  $\text{tg}\mu_n = \mu_n / (Bi - 1)$ ;

$Bi$  – критерий Био,  $Bi = (\alpha \cdot R_v) / \lambda_3$ ;

$\lambda_3$  – теплопроводность зерна, Вт/(м·К);

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи при конденсации пара, Дж/(м<sup>2</sup>·К·с);

$A_n, B_n$  – соответственно начальные тепловые амплитуды и постоянные коэффициенты, табулированные для различных значений  $Bi$ .

Теплофизические характеристики зерна и водяного пара взяты из ранее опубликованных работ [4, 5], а геометрические характеристики зерновок – по Г.А. Егорову [6].

Точный расчёт коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  конденсатной плёнки поверхности зерна затруднителен из-за невозможности учёта поверхностных эффектов, а также динамичности слоя зерна, поэтому можно говорить лишь о примерной его оценке.

Для этого воспользуемся формулой Нуссельта, преобразованной применительно к периоду прогрева слоя зерна [7, 8]:

$$\alpha = 0,36 \times \left[ \frac{\lambda_k^3 \cdot \rho_k^2 \cdot r \cdot g}{(T_s - T_3) \cdot \mu_k \cdot h} \right]^{0,25}, \quad (7)$$

где  $\lambda_k$  – теплопроводность конденсата, Вт/(м·К);

$\rho_k$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;

$r$  – удельная теплота парообразования при температуре насыщения, Дж/кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$T_3$  – температура зерна, К;

$\mu_k$  – кинематическая вязкость конденсата, м<sup>2</sup>/с;

$h$  – толщина слоя зерна, м.

При расчётах производилась оценка минимального значения  $\alpha$ , т.е. при  $T_3 = T_0$ . Расчёты показали, что  $Bi$  составляет не менее 60.

Конвективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  в период прогрева рассчитали для случая испарения влаги со свободной поверхности при вынужденной конвекции перегретого пара и небольших, как показали расчёты, числах Рейнольдса ( $Re < 200$ ) по критериальному уравнению [9]:

$$Nu = 2 + 1,05 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re^{0,5} \cdot Gu^{0,175}, \quad (8)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта,  $Nu = \frac{\alpha_k \cdot d}{\lambda_3}$ ;

$Pr$  – критерий Прандтля,  $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda_p}$ ;

$Re$  – критерий Рейнольдса,  $Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{\rho_p \cdot v_p \cdot d}{\mu}$ ;

$Gu$  – параметрический критерий Гухмана,

$$Gu = \frac{T_p - T_s}{T_p};$$

$\lambda_p$  – теплопроводность пара, Вт/(м·К);

$d$  – эквивалентный диаметр зерновки, м;

$\nu, \mu$  – соответственно кинематическая, (м<sup>2</sup>/с) и динамическая, (Па·с) вязкости пара;

$v_p$  – скорость потока генерируемого пара через слой зерна, м/с;

$\rho_p$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;

$c_p$  – удельная теплоёмкость пара, Дж/(кг·К).

Расчёты показали, что в условиях проводимых исследований критерий  $Re < 170$ , что подтверждает применимость формулы (8).

Вычислим такие важные показатели периода прогрева, как максимальную величину влагосодержания  $u_{\text{max}}$  и время её достижения  $\tau_0$ , приравняв производную от уравнения (2) нулю:

$$\frac{du_1(\tau)}{d\tau} = \frac{c_3 \cdot \rho_{\text{пз}} \cdot (T_s - T_0) \cdot a}{[c_p \cdot (T_p - T_s) + r] \cdot \rho_p \cdot R^2} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2 \cdot B_n \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo) - \frac{\alpha_k \cdot (T_p - T_s)}{r \cdot \rho_{\text{сз}} \cdot R_v} = 0.$$

Подставив найденное значение  $\tau_0$  в уравнение теплового баланса (2), определялось  $u_{\text{max}}$ .

Учитывая быструю сходимость ряда, в уравнении (6) можно ограничиться  $n = 1$  без существенных потерь в точности.

После завершения периода прогрева зерна начинается период испарения влаги с его поверхности, т.е. сушки с постоянной скоростью  $N = du/d\tau = \text{const}$  при постоянной температуре  $T_s$ . Этот процесс происходит до достижения первого критического влагосодержания  $u_{\text{кр1}}$ . В этот период на зерно воздействует конвективный поток тепла от перегретого пара и кондуктивный поток тепла от генерирующей поверхности при одинаковых температурах обоих агентов  $T_p = T_{\text{пп}}$ .

Комбинированная конвективно-кондуктивная сушка характеризуется повышенной интенсивностью, что может существенно сократить длительность ГТО в целом и ограничить выход зерна с высокими технологическими свойствами и вырабатываемой из него высококачественной крупы. В связи с этим наличие избыточного давления пара, препятствующего испарению влаги с поверхности зерна, может оказывать благоприятное влияние на весь процесс ГТО.

При постоянной температуре греющей поверхности и перегретого пара, а также пересыпающемся слое зерна механизм конвективной и кондуктивной сушки схож [9, 10]. В этом случае постоянная скорость конвективно-кондуктивной сушки  $N_{\text{кк}}$ , кг/(кг·с), которую можно приблизительно определить графически по результатам экспериментальных исследований, предопределяет кинетику влагосодержания при различных температурных режимах теплоносителей в этот период.

Для описания кинетики изменения влагосодержания зерна в период его сушки представляет интерес знание величины скорости снижения влагосодержания при постоянной скорости сушки и конвективно-кондуктивном теплообмене при том или ином режиме ГТО, которую можно при-

ближённо определить графически по результатам экспериментальных исследований. Принимая в качестве начального влагосодержания  $u_n = u_{max}$ , кинетику влагосодержания можно описать формулой [11, 12]:

$$u_2(\tau) = u_{max} - N_{кк} \cdot \tau, \quad (10)$$

а время достижения зерном нормируемого влагосодержания составит  $\tau^* = (u_{max} - u^*)/N_{кк}$ .

Результаты исследований, приведённые на рисунке 1, показывают, что расхождение расчётных и экспериментальных данных не превышает 12 %, а значения критического влагосодержания оказались меньше нормативных при рассматриваемых температурных режимах, что подтверждает применимость формулы (10).

Результаты исследований [13] показали также, что зерно приобретает регламентированный стандартами коричневый цвет после 4,5–5,0 мин. обработки как насыщенным, так и перегретым паром в рассматриваемых температурных интервалах. Это объясняется тем, что, как в период прогрева, так и в период снижения влагосодержания зерна определяющим фактором является одинаковая для них температура  $T_s$  при заданном давлении пара.

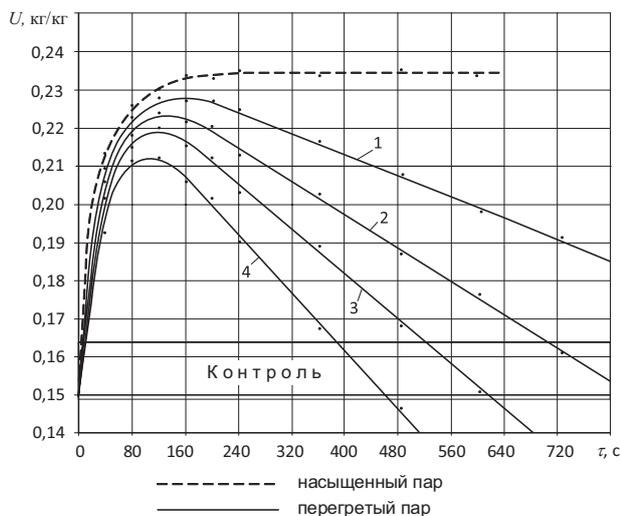


Рис. 1 – Кривые кинетики влагосодержания зерна гречихи при его ГТО перегретым паром давлением 0,3 МПа и температурах, К: 1 – 426; 2 – 436; 3 – 446; 4 – 456

Можно отметить существенное влияние степени перегрева пара на кинетику влагосодержания зерна. Наличие выраженного максимума кривой изменения влагосодержания проявляется уже при перегреве пара  $\Delta T = 10$  К. При таком температурном режиме ГТО зерна скорость уменьшения влагосодержания невелика, и для достижения его нормативных значений требуется слишком много времени, однако при длительности обработки 8,6 мин. можно получить зерно с влагосодержанием  $u = 0,205$  кг/кг ( $W = 17$  %),

которое позволяет производить последующую сушку в автономной сушилке за один проход, что соответствует требованиям регламента технологического процесса производства быстро разваривающейся гречневой крупы с помощью выпускаемого оборудования мини-цехов (АО «ЖАСКО», ООО «АГРОМАШ», ООО «ОЛИС»). Такой же результат можно получить при ГТО в течение 5,5 мин. при использовании пара с перегревом 20 К. Нужно также отметить, что в этих условиях можно получить зерно с нормативным влагосодержанием при длительности обработки 12–14 мин., а при использовании пара с перегревом 30 К – в течение 8,5–10,0 мин., что можно считать приемлемым.

В рассмотренных случаях переработанное зерно имело удовлетворительные технологические показатели: коэффициент шелушения –  $K_{ш} = 58–67\%$ , коэффициент целостности ядра –  $K_{ця} = 62–66\%$ .

Использование пара с перегревом  $\Delta T = 40$  К позволяет произвести весь процесс ГТО до получения зерна с нормированным влагосодержанием за 6,5–7,7 мин., однако при этом ухудшаются его технологические показатели. Это можно объяснить слишком малым временем периода прогрева и недостаточным увлажнением ядра зерна, что приводит лишь к частичной его монолитизации.

**Выводы.** Проведённое исследование показало возможность использования перегретого до определённой степени пара для ГТО зерна гречихи в предложенной установке.

При использовании пара небольшой перегретости  $\Delta T = 10–15$  К и завершении ГТО с подсушиванием зерна до влажности 16–17 % обеспечивается возможность последующей сушки до нормированного влагосодержания в автономной сушилке за один проход, что является оптимальным для этой операции.

При перегретости пара  $\Delta T = 20–30$  К и длительности ГТО 8,5–12,5 мин. процесс предварительной обработки можно считать завершённым. Подготовленное к дальнейшему шелушению зерно имело удовлетворительные технологические показатели (коэффициент эффективности шелушения  $K_{эш} = 60–66$  %), а выработанная из зерна крупа – достаточно высокое качество.

### Литература

1. Инноват. пат. 23957 Республика Казахстан. В02В 1/08. Способ гидротермической обработки зерна гречихи и аппарат для его осуществления / А.А. Румянцев, Н.А. Борзов, Л.Ф. Беспалько; опубл. 16.05.2011. Бюл. № 5.
2. Шевцов А.С. Научное обеспечение энергосберегающих процессов сушки и тепловлажностной обработки пищевого растительного сырья при переменном теплоподводе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж: ВГУИТ, 2015. 48 с.
3. Лыков А.В. Теплообмен. М.: Энергия, 1978. 479 с.
4. Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы. М.: Колос, 1984. 304 с.
5. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980, 424 с.

6. Егоров Г. А. Технологические свойства зерна. М.: Агропромиздат, 1985. 334 с.
7. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных плёнках. Киев: Техніка, 1972. 196 с.
8. Калашников Г.В., Остриков А.Н. Ресурсосберегающие технологии пищевых концентратов: монография. Воронеж: ВГУ, 2001. 356 с.
9. Лыков М.В. Теория сушки. М, 1968, 472 с.
10. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В.И. Курдюмов [и др.]. Ульяновск: УГСХА имени П.А. Столыпина, 2013. 290 с.
11. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперстных материалов. М.: Химия, 1988. 351 с.
12. Энергосберегающие технологии и оборудование для сушки пищевого сырья / А.Н. Остриков [и др.]. Воронеж. гос. технол. акад. Воронеж, 1998. 344 с.
13. Константинов М.М., Румянцев А.А. Комплексный показатель эффективности технологического процесса производства крупы // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 6. С. 81–82.

**Румянцев Александр Алексеевич**, кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»  
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Республики, 7  
E-mail: rumyantsevaa@gausz.ru

**Константинов Михаил Маерович**, доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»  
Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18  
E-mail: orensau@mail.ru

**Борзов Николай Андреевич**, ведущий специалист  
ТОО «Казагроэксперт»

Республика Казахстан, 110015, г. Костанай, ул. Чкалова, 4

**Юхин Геннадий Петрович**, доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»  
Россия, 450001, Республика Башкортостан, ул. 50-летия Октября, 34  
E-mail: Gpet1@yandex.ru

## Rationale for the use of superheated steam for hydrothermal processing of cereal grains

**Rumyantsev Alexander Alekseevich**, Candidate of Technical Sciences  
Northern Trans-Ural State Agricultural University  
7, Republic St., Tyumen, 625003, Russia  
E-mail: rumyantsevaa@gausz.ru

**Konstantinov Mikhail Maerovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
Orenburg State Agrarian University  
18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia  
E-mail: orensau@mail.ru

**Borzov Nikolay Andreevich**, leading specialist  
LLP "Kazagroexpert"

4, Chkalova St., Kostanay, 110015, Republic of Kazakhstan

**Yukhin Gennady Petrovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor  
Bashkir State Agrarian University  
34, 50-let October St., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001, Russia  
E-mail: Gpet1@yandex.ru

In article it is offered for hydrothermal processing (HTP) of cereal grains (buckwheat) before his peeling to use as warm and the moisture carrier superheated steam with low overheating. Such treatment is represented by a continuous process of the step of heating and humidifying the grain by condensing steam on its surface to the step of drying at a constant rate. When using steam of low overheating of  $\Delta T = 10-15$  K and completion of HTP with grain drying to moisture content of 16–17 %, it is possible to further dry to normalized moisture content in an autonomous dryer in one pass, which is optimal for this operation. With overheating of  $\Delta T = 20-30$  K steam and duration of HTP 8.5–12.5 minutes, the pre-treatment process can be considered completed, and the grain is prepared for its further exfoliation. In the considered cases, the processed grain had satisfactory technological indicators: exfoliation coefficient 58–67 %, nucleus integrity coefficient 62–66 %, exfoliation efficiency coefficient 60–66 %.

**Key words:** processing, grain, superheated steam, drying, moisture content.