

Разработка высокоэффективной технологии влаготепловой обработки зерна и конструкции кондиционера-пропаривателя

Валерий А. Афанасьев ¹	vnii_kp@gmail.ru
Александр Н. Остриков ¹	oan@vsuet.ru
Владимир В. Мануйлов ¹	manuylovv@mail.ru
Алексей И. Александров ¹	alex-nadezhda@mail.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В результате выполненных экспериментальных исследований были определены основные кинетические закономерности исследуемого процесса пропаривания и обоснован выбор рациональных режимов процесса влаготепловой обработки зерна: пропаривание паром ячменя и пшеницы до влажности 19% при расходе пара 100–180 кг/ч и давлении 0,20–0,35 МПа в течение 10–12 минут, а кукурузы – от 15 до 16 минут. Эти разработанные режимы обеспечивают наилучшие условия для термомеханической деструкции белково-углеводного комплекса с целью повышения доступности его действию пищеварительных ферментов и увеличение переваримости крахмала, не снижают переваримость протеина и улучшают санитарное состояние. Была разработана методика инженерного расчета, которая легла в основу создания оригинальной конструкции кондиционера-пропаривателя. Выполненный конструктивный расчет включал расчет смесителя-увлажнителя, расчет струйной форсунки и определение дисперсных характеристик при распыливании пара, а также тепловой расчет кондиционера-пропаривателя, который позволил определить расход пара и подобрать рациональную температуру нагрева зерен и величину их влажности. Отличительной особенностью кондиционера-пропаривателя является более высокая производительность вследствие существенного ускорения процесса диффузии влаги внутрь зерен; возможность улучшения качества за счет повышения степени клейстеризации крахмала вследствие подобранных технологических режимов пропаривания.

Ключевые слова: технология, пропаривание, зерно, пар, кондиционер-пропариватель, методика расчета

Development of highly efficient technology of grain moisture-heat treatment and the design of conditioner steamer

Valery A. Afanasiev ¹	vnii_kp@gmail.ru
Alexander N. Ostrikov ¹	oan@vsuet.ru
Vladimir V. Manuilov ¹	manuylovv@mail.ru
Alexey I. Aleksandrov ¹	alex-nadezhda@mail.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. As a result of the conducted experimental studies, the main kinetic regularities of the steaming process under investigation were determined and the choice of rational modes of grain moisture-heat treatment was validated: steaming of barley and wheat with steam to a moisture content of 19 % at a steam consumption of 100–180 kg/h and a pressure of 0.20–0.35 MPa for 10–12 minutes, and corn – for 15–16 minutes. These developed modes provide the best conditions for the thermomechanical destruction of the protein-carbohydrate complex in order to increase its availability to digestive enzymes and increase the digestibility of starch, do not reduce the digestibility of protein and improve sanitary condition. A method of engineering calculation was developed, which formed the basis for the creation of an original design of conditioner steamer. The performed constructive calculation included the calculation of the mixer-humidifier, the calculation of the jet nozzle and the determination of the dispersed characteristics during steam atomization, as well as the thermal calculation of the conditioner steamer, which made it possible to determine the steam consumption and determine the rational heating temperature of the grains and their moisture content. A distinctive feature of the conditioner steamer is a higher productivity due to the significant acceleration of diffusion process of moisture into grains; the possibility of improving the quality by increasing the degree of starch gelatinization due to selected technological steaming modes.

Keywords: technology, steaming, grain, steam, conditioner steamer, calculation method

Введение

Зерно злаковых культур наряду с другими видами питательных веществ содержит много крахмала, усвоение которого при кормлении животных происходит медленно, при этом продуктивно используются только определенные формы и то в небольшом количестве [2, 3]. По данным ряда исследований, усвояемость

питательного потенциала крахмала в созданной природной форме не превышает 20–25% в зависимости от вида культур. Поэтому задача новых технологий переработки зерна состоит во внедрении таких способов обработки исходного сырья, которые позволили бы перевести крахмал в удобную для усвоения организмом животных форму [1, 4]. Это возможно при разрушении

Для цитирования

Афанасьев В.А., Остриков А.Н., Мануйлов В.В., Александров А.И. Разработка высокоэффективной технологии влаготепловой обработки зерна и конструкции кондиционера-пропаривателя // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 1. С. 19–26. doi:10.20914/2310-1202-2019-1-19-26

For citation

Afanasiev V.A., Ostrikov A.N., Manuilov V.V., Aleksandrov A.I. Development of highly efficient technology of grain moisture-heat treatment and the design of conditioner steamer. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2019. vol. 81. no. 1. pp. 19–26. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2019-1-19-26

зернистой структуры крахмала на клеточном уровне, что способствует разрыву природных связей между отдельными составляющими частями и переводу в более простые углеводы в виде декстринов и сахаров, т. е. происходит желатинизация крахмала или декстринизация его на более простые составляющие [2, 3].

Без специальной обработки трудноусвояемой является и клетчатка, которая содержится в большом количестве в зерне и бобах, особенно в их верхних защитных слоях и оболочках. Поэтому разрабатываемые способы углубленной переработки исходного зернового сырья должны способствовать деструкции части целлюлозно-лигниновых образований клетчатки в природных формах в более простые виды моносахаров [5].

Под воздействием теплоты и влаги в зерне протекают сложные биохимические процессы, в результате которых происходит клейстеризация и декстринизация крахмала. Клейстеризацию определяют как разрыв оболочек крахмальных гранул под воздействием возрастающего внутри зерна давления. Благодаря клейстеризации комплекс молекул нативного крахмала легче расщепляется на простые растворимые углеводы, так как ферменты, превращающие полисахариды в моносахара, на оклейстеризованный крахмал действуют гораздо интенсивнее. Действие высоких температур при нагревании вызывает деструкцию крахмала, сопровождающуюся укорачиванием цепей макромолекул и образованием легкорастворимых углеводов, в первую очередь, декстринов [6].

Пропаривание зерна сопровождается увеличением его влажности, причем приращение влажности будет определяться условиями процесса: состоянием слоя обрабатываемого зерна, условиями и характером обтекания зерен потоком пара, параметрами и его количеством, длительностью воздействия.

При разработке режимов процессов необходимо стремиться к тому, чтобы вся влага, внесенная паром, была поглощена зерном.

Механизм увлажнения зерна паром определяется сорбцией влаги поверхностью зерен и последующим ее внутренним переносом. Вопросы проникновения влаги в зерно изучались многими исследователями, которыми установлено, что при увлажнении паром влага в зерновку практически равномерно проникает по всей ее поверхности. В начальные моменты обработки, когда температура зерна низкая, происходит конденсация пара на его поверхности и дальнейшее диффузионное проникновение влаги внутрь зерна.

В неподвижной паровой среде увлажнение зерна незначительно. Для достижения необходимой интенсивности увлажнения и приращения влажности следует увеличить скорость потока пара или количество его на единицу веса материала [4, 5, 8–10].

Цель работы – обоснование выбора технологических режимов влаготепловой обработки зерна и расчет и обоснование конструкции кондиционера-пропаривателя.

Результаты и обсуждения

Исследованиями установлено, что пропаривание при избыточном давлении 0,05–0,35 МПа не позволяет повысить влажность обрабатываемого зерна до 18–20% без предварительного замачивания. Известно, что зерно ячменя состоит в основном из гидрофильных биополимеров – белков и углеводов, которые обладают способностью поглощать и удерживать влагу.

Температура зерна в зависимости от условий процесса пропаривания повышается до 95–97 °С в течение 2–3 мин. При этом на интенсивность тепло- и влагообмена оказывает существенное влияние расход пара.

Производство требует интенсивного ведения процессов, поэтому, учитывая условия пропаривания: перемешиваемый лопатками слой зерна с начальной температурой 10–20 °С, подвод пара в нескольких точках аппарата и др., принимаем для исследования расход пара в пределах от 110 до 550 г/(кг·мин).

Установлено, что эффективность процесса увлажнения зерна ячменя влажным паром очень высокая, особенно в начальный период до полного насыщения водой. Сравнение расчетных и фактических данных увлажнения зерна показывает, что в первые 3 мин около 90 % пара поглощается зерном. В дальнейшем по достижении влажности 27–30% темп увлажнения зерна замедляется, однако, на нашему мнению, длительная обработка паром должна увеличить степень клейстеризации крахмала зерна.

Эффективность увлажнения зерна зависит от параметров поступающего пара. При одинаковом расходе пара и продолжительности обработки процесс увлажнения происходит более интенсивно при подаче пара с меньшим давлением. Результаты опытов по обработке ячменя влажным паром при давлении 0,15–0,20 МПа показывают, что процесс увлажнения проходит более интенсивно. Так, влажность зерна достигает величины 30–33% в течение 3–5 мин при расходе пара 0,11 кг/мин на 1 кг зерна (рисунок 1).

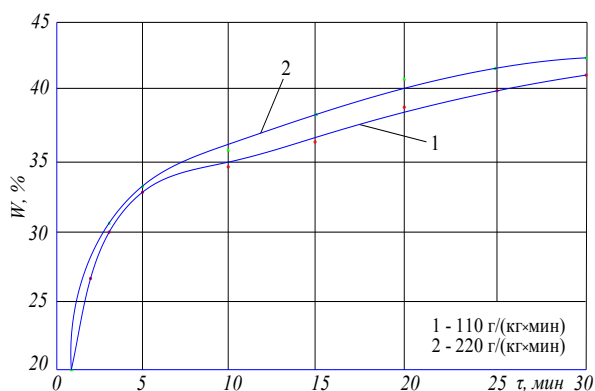


Рисунок 1. Характер изменения влажности зерна при обработке паром при давлении 0,15–0,2 МПа

Figure 1. The nature of changes in the moisture content of grain when processing with steam pressure of 0.15–0.2 MPa

Увеличение расхода пара хотя и интенсифицирует процесс увлажнения зерна, однако приводит к большему его расходу и, следовательно, экономически нецелесообразно. В процессе обработки ячменя паром отмечены изменения физико-механических свойств. Так, температура зерна после пропаривания возросла до 85–90 °С, объемная масса пропаренного ячменя снизилась с 670 до 610–630 кг/м³, что объясняется набуханием зерна при увлажнении.

Помимо физико-механических свойств изменениям подверглись и биохимические свойства зерна. Выявлено влияние длительности обработки и расхода пара на степень клейстеризации крахмала. Полученные результаты (рисунок 2) позволяют сделать вывод о том, что степень клейстеризации крахмала увеличивается с увеличением длительности пропаривания и практически не зависит от расхода пара в исследованных пределах.

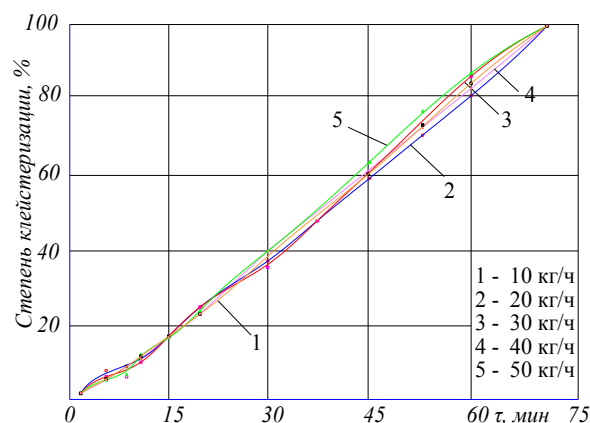


Рисунок 2. Влияние расхода пара и длительности пропаривания на степень клейстеризации крахмала ячменя

Figure 2. The effect of steam consumption and steaming time on the degree of gelatinization of barley starch

В процессе пропаривания молекулы воды, образующие пар, располагают большим запасом кинетической энергии и беспрепятственно преодолевают влагоудерживающие слои зерна. В результате обработки паром зерно гораздо быстрее увлажняется и набухает, чем при обработке водой.

Расчет смесителя-увлажнителя. Скорость движения зерна по корпусу смесителя определяется по формуле:

$$v = \frac{b n \sin 2\alpha \cdot (m-1)}{120} (\cos \alpha - \varphi \sin \alpha) =$$

$$= \frac{0,05 \cdot 342 \cdot \sin 60^\circ \cdot (5-1)}{120} \times$$

$$\times (\cos 30^\circ - 0,3 \cdot \sin 30^\circ) = 0,35 \text{ м/с},$$

где v – скорость движения смеси по корпусу смесителя, м/с; b – ширина лопатки, м; n – частота вращения вала, мин⁻¹; α – угол наклона лопаток, град.; m – количество лопастей в одном шаге, шт.; φ – коэффициент трения.

Диаметр камеры смесителя определяется из выражения:

$$D = \sqrt{\frac{1,27 \cdot Q}{v \cdot \rho \cdot K \cdot \eta \cdot \psi}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,27 \cdot 0,833}{0,35 \cdot 500 \cdot 0,3 \cdot 0,4 \cdot 0,4}} = 0,36 \text{ м},$$

где $D = 400$ мм – диаметр камеры смесителя, м; $Q = 3000$ кг/ч = 0,833 кг/с – производительность, кг/с; $\rho = 500$ кг/м³ – насыпная плотность ячменя смеси, кг/м³; K – коэффициент влияния формы лопаток; $\eta = 0,4$ – коэффициент влияния величины зазора; $\psi = 0,4$ – коэффициент заполнения камеры смесителя; v – осевая скорость смеси, м/с.

Оптимальное расстояние между лопастями определяется по формуле:

$$l = \frac{b \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma}{\cos(\alpha + \gamma)} =$$

$$= \frac{0,05 \cdot 0,5 \cdot 0,87 \cdot 0,66}{0,19} = 0,075 \text{ м},$$

где l – оптимальное расстояние между лопастями, м; γ – угол трения продукта о лопасть ($\gamma = 50^\circ$).

Шаг лопастей определяется из выражения:

$$S = (m-1) \cdot l = (5-1) \cdot 0,075 = 0,3 \text{ м}.$$

Рабочая длина камеры смесителя определяется по формуле:

$$L = (8 \div 9) \cdot S = 8 \cdot 0,3 \div 9 \cdot 0,3 = 2,4 \div 2,7 \text{ м}.$$

Расчет кондиционера-пропаривателя. Шаг шнека H , м, и диаметр вала шнека d , м (рисунок 3):

$$H = K \cdot D = 0,9 \cdot 0,6 = 0,54 \text{ м};$$

$$d = K_1 \cdot D = 0,28 \cdot 0,6 = 0,168 \text{ м},$$

где коэффициенты $K = 0,7 \dots 0,9$; $K_1 = 0,25 \dots 0,4$.

Шаг шнека выбираем равным $H = 0,6$ м. По полученному значению $d = 168$ мм подбираем стальную бесшовную холоднокатаную трубу для изготовления вала с размерами (по ГОСТ 8734–78): наружный диаметр $d = 168$ мм; толщина стенки – 14 мм (рисунок 3).

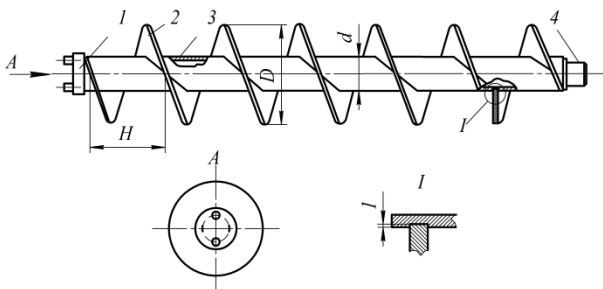


Рисунок 3. Шнек с полым валом: 1 – опорная цапфа; 2 – виток; 3 – полый вал; 4 – ведущая цапфа

Figure 3. Screw with hollow shaft: 1 – support axle; 2 – turn; 3 – hollow shaft; 4 – drive axle

Угол подъема винтовой линии шнека на периферии, α_D , рад:

$$\begin{aligned}\alpha_D &= \arctg[H/(\pi D)] = \\ &= \arctg[0,6/(3,14 \cdot 0,6)] = 0,3083 \text{ рад}.\end{aligned}$$

Угол подъема винтовой линии шнека у вала α_d , рад:

$$\begin{aligned}\alpha_d &= \arctg[H/(\pi d)] = \\ &= \arctg[0,6/(3,14 \cdot 0,168)] = 0,721 \text{ рад}.\end{aligned}$$

С достаточной для инженерных расчетов точностью принимаем среднеарифметический угол подъема винтовой линии α_{cp} , рад:

$$\begin{aligned}\alpha_{cp} &= 0,5(\alpha_D + \alpha_d) = \\ &= 0,5(0,3083 + 0,721) = 0,5147 \text{ рад} \approx 29^\circ 30' .\end{aligned}$$

Коэффициент отставания транспортируемого материала K_o :

$$\begin{aligned}K_o &= 1 - [\cos^2 \alpha_{cp} - 0,5 f \sin(2\alpha_{cp})] = \\ &= 1 - [\cos^2 29^\circ 30' - 0,5 \cdot 0,5 \sin(2 \cdot 29^\circ 30')] = 0,5.\end{aligned}$$

Зерно, которое транспортируется в шнековых кондиционерах, обладает адгезией. В этом случае в качестве f используется коэффициент внутреннего трения.

Предельный диаметр вала шнека $d_{пр}$, м:

$$d_{пр} = (H/\pi) \operatorname{tg} \varphi = (0,6/3,14) \cdot 0,6 = 0,115 \text{ м},$$

где $\operatorname{tg} \varphi = f$ – коэффициент трения, $f = 0,6$ (φ – угол трения).

Диаметр вала шнека d всегда принимается больше $d_{пр}$. Таким образом, условие $d \geq d_{пр}$ ($0,168 \text{ м} > 0,115 \text{ м}$) выполняется.

Наибольший изгибающий момент в последнем витке шнека по внутреннему контуру M_u , (Н·м)/м:

$$\begin{aligned}M_u &= \frac{P_{\max} D^2}{32} \cdot \frac{1,9 - 0,7 a^{-4} - 1,2 a^{-2} - 5,2 \ln a}{1,3 + 0,7 a^{-2}} = \\ &= \frac{0,3 \cdot 10^6 \cdot 0,6^2}{32} \times \\ &\times \frac{1,9 - 0,7 \cdot 3,57^{-4} - 1,2 \cdot 3,57^{-2} - 5,2 \ln 3,57}{1,3 + 0,7 \cdot 3,57^{-2}} = \\ &= -8785,5 \text{ Н} \cdot \text{м/м},\end{aligned}$$

где $a = D/d$ – отношение диаметров шнека и вала шнека ($a = 600/168 = 3,57$).

Толщина витка шнека δ , м:

$$\delta = \sqrt{\frac{6M_u}{[\sigma]}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 8785,5}{145 \cdot 10^6}} = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 19 \text{ мм},$$

где $[\sigma] = 145 \text{ МПа}$ – допускаемое напряжение материала витка шнека при изгибе.

Допускаемое напряжение при изгибе можно принять равным допускаемому напряжению при растяжении. Номинальное допускаемое напряжение при растяжении для стали 20 равно $[\sigma] = 145 \cdot 10^6 \text{ Па}$ [7].

Угловая частота вращения шнека ω , с^{-1} , определяется исходя из производительности Π , кг/с, его геометрических параметров и коэффициента отставания K_o из зависимости

$$\Pi = 0,125(D^2 - d^2)(H - \delta)(1 - K_o) \rho \psi \omega,$$

где ρ – плотность транспортируемого ячменя, кг/м^3 ; ψ – коэффициент подачи, учитывающий степень заполнения межвиткового пространства и режим работы формующего устройства. Для транспортирующего кондиционера $\psi = 0,7$.

Тогда

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{0,833}{0,125 \cdot (0,6^2 - 0,168^2)} \times \\ &\times \frac{1}{(0,6 - 0,019)(1 - 0,5) \cdot 0,7 \cdot 530} \approx 0,2 \text{ с}^{-1}.\end{aligned}$$

Площадь внутренней цилиндрической поверхности корпуса шнекового устройства по длине одного шага F_b , м^2 :

$$\begin{aligned}F_b &= \pi D(H - \delta) = \\ &= 3,14 \cdot 0,6(0,6 - 0,019) = 1,095 \text{ м}^2.\end{aligned}$$

Площадь поверхности витка шнека по длине одного шага F_u , м^2 :

$$F_{\text{ш}} = \frac{1}{4\pi} \left(\pi DL - \pi dl + H^2 \ln \frac{D+2L}{d+2l} \right) = \frac{1}{4 \cdot 3,14} \times$$

$$\times \left(3,14 \cdot 0,6 \cdot 2 - 3,14 \cdot 0,168 \cdot 0,8 + 0,6^2 \ln \frac{0,6+2 \cdot 2}{0,168+2 \cdot 0,8} \right) =$$

$$= 0,294 \text{ м}^2,$$

где L и l – длины винтовых линий, соответствующие диаметрам шнека и вала, м;

$$L = \sqrt{H^2 + (\pi D)^2} = \sqrt{0,6^2 + (3,14 \cdot 0,6)^2} = 2 \text{ м};$$

$$l = \sqrt{H^2 + (\pi d)^2} = \sqrt{0,6^2 + (3,14 \cdot 0,168)^2} = 0,8 \text{ м}.$$

Условие работоспособности шнекового кондиционера соблюдается, т. к. $F_{\text{в}} > F_{\text{ш}}$ ($1,095 \text{ м}^2 > 0,294 \text{ м}^2$) [7].

Крутящий момент на валу шнека $M_{\text{кр}}$, Н·м:

$$M_{\text{кр}} = 0,131 n P_{\text{max}} (D^3 - d^3) \text{tg} \alpha_{\text{ср}} =$$

$$= 0,131 \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 10^6 (0,6^3 - 0,168^3) \text{tg} 29^\circ = 9,78 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $n = 2$ – число рабочих витков шнека.

Осевая сила, действующая на вал шнека $S_{\text{ос}}$, Н:

$$S_{\text{ос}} = 0,392 n (D^2 - d^2) P_{\text{max}} =$$

$$= 0,392 \cdot 2 (0,6^2 - 0,168^2) 0,1 \cdot 10^6 = 26011 \text{ Н}.$$

Нормальные $\sigma_{\text{сж}}$, Па, и касательные τ , Па, напряжения в опасном сечении вала шнека

$$\sigma_{\text{сж}} = S_{\text{ос}} / F; \quad \tau = M_{\text{кр}} / W_{\text{р}},$$

где F – площадь поперечного сечения полого вала шнека, м^2 ;

$$F = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_{\text{вн}}^2) =$$

$$= \frac{3,14}{4} (0,168^2 - 0,14^2) = 0,00677 \text{ м}^2,$$

где d , $d_{\text{вн}}$ – соответственно наружный и внутренний диаметры полого вала шнека ($d = 0,168 \text{ м}$; $d_{\text{вн}} = 0,14 \text{ м}$). Полюй вал выбирается с целью облегчения конструкции шнека.

Для полого вала

$$\sigma_{\text{сж}} = 26011 / 0,00677 = 3,84 \text{ МПа}.$$

Полярный момент сопротивления полого вала шнека $W_{\text{р}}$, м^3 :

$$W_{\text{р}} = \frac{\pi d^3}{16} \left(1 - \frac{d_{\text{вн}}^4}{d^4} \right) \approx 0,2 d^3 \left(1 - \frac{d_{\text{вн}}^4}{d^4} \right) =$$

$$= 0,2 \cdot 0,168^3 \left(1 - \frac{0,14^4}{0,168^4} \right) = 491 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Для полого вала

$$\tau = 0,00978 / 491 \cdot 10^{-6} = 19,9 \text{ Па}.$$

Эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв}}$, Па, для полого вала

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_{\text{сж}}^2 + 4\tau^2} =$$

$$= \sqrt{(3,84 \cdot 10^6)^2 + 4(19,9)^2} = 3,85 \text{ МПа}.$$

Проверим условие прочности полого вала шнека

$$3,85 \text{ МПа} < 180 \text{ МПа},$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала вала, Па. Принимаем, что вал шнека изготовлен из стали 12Х18Н10Т, для которой $[\sigma] = 180 \cdot 10^6 \text{ Па} = 180 \text{ МПа}$.

Таким образом, условие прочности для полого вала выполняется.

Мощность, затрачиваемая на привод шнекового кондиционера N , кВт:

$$N = 10^{-3} M_{\text{кр}} \omega / \eta =$$

$$= 10^{-3} \cdot 9,78 \cdot 10^3 \cdot 0,2 / 0,65 \approx 3 \text{ кВт},$$

где $\eta \approx 0,65$ – КПД привода.

В кондиционерах используются сварные шнеки. В этом случае для получения шнека диаметром D , м, с заданным диаметром вала d , м, и шагом H , м, следует изготовить кольца (рисунок 4) с наружным D_o и внутренним d_o диаметрами и разомкнутыми на угол выреза α_o .

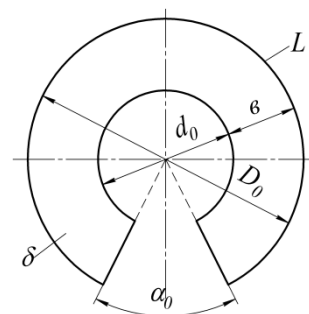


Рисунок 4. Кольцевая заготовка для шнека

Figure 4. Ring preparation for the screw

Длина шнека $L_{\text{шн}}$, м

$$L_{\text{шн}} = z \cdot H = 7 \cdot 0,6 = 4,2 \text{ м}.$$

Ширина винтовой поверхности b , м:

$$b = 0,5(D - d) = 0,5(0,6 - 0,168) = 0,216 \text{ м}.$$

Угол выреза α_o , рад:

$$\alpha_o = 2\pi - (L - l) / b =$$

$$= 2 \cdot 3,14 - (4,2 - 2,938) / 0,216 =$$

$$= 0,442 \text{ рад} = 25^\circ.$$

Если на валу предварительно проточить винтовую канавку под витки шнека, то размеры колец-заготовок рассчитываются с учетом глубины и ширины канавки.

Определение дисперсных характеристик при распыливании пара. Проведенный анализ основных типов гидравлических форсунок показал, что применительно к исследуемому процессу увлажнения зерна наиболее предпочтительны струйные форсунок.

Струйная форсунка (рисунок 5) представляет собой насадок с соплом, из которого вытекает струя, распадающаяся на капли относительно крупного размера и образующая факел с малым корневым углом и значительной дальностью струи. Наилучшее равномерное мелкодиспергированное распыливание пара наблюдалось при использовании форсунок с диаметром 0,8–1,0 мм.

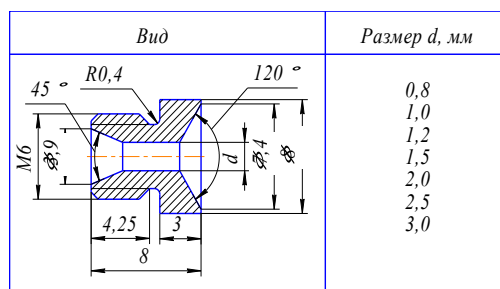


Рисунок 5. Струйная форсунка

Figure 5. Jet nozzle

Для определения дисперсных характеристик распыливаемого пара было получено критериальное уравнение

$$\frac{d_{32}}{d_c} = 3,2 \text{ We}^{-0,6} \text{ Lp}^{-0,005} \left(\frac{D}{L} \right)^2,$$

где d_{32} – средний объемно-поверхностный диаметр пара, м; d_c – диаметр соплового канала конически расходящейся струйной форсунки, м; $\text{We} = (w_n^2 l \rho_n) / \sigma$ – критерий Вебера; $\text{Lp} = (l \rho_n \sigma) / \mu_n^2$ – критерий Лапласа; w_n – скорость пара на выходе из форсунки, м/с; σ – поверхностное натяжение пара, Н/м; ρ_n – плотность пара, кг/м³; μ_n – динамическая вязкость пара, Па·с; l – длина соплового канала форсунки, м; D – диаметр факела распыла пара (за диаметр факела принят диаметр сечения D_{95} , внутри которого протекает не менее 95 % всего пара); L – дальность факела распыла пара, м.

Тепловой расчет кондиционера-пропаривателя. Исходные данные: начальная влажность зерна 12%; конечная влажность зерна 20%; начальная температура зерна на входе 20 °С; конечная температура зерна на выходе 70 °С. Удельная теплоемкость сухих веществ зерна ячменя составляет 1,423 кДж/(кг·К). Удельная теплоемкость воды составляет 4,19 кДж/(кг·К) [8–10].

Уравнение теплового баланса.

$$Q_{\text{св}}^{\text{н}} + Q_{\text{в}}^{\text{н}} + Q_{\text{ув}} + Q_{\text{оп}} = Q_{\text{св}}^{\text{к}} + Q_{\text{в}}^{\text{к}} + Q_{\text{пот}},$$

где $Q_{\text{св}}^{\text{н}} = G_{\text{св}} c_3 t_{\text{н}}$ – теплота, вносимая сухим веществом зерна, кДж/ч; $Q_{\text{св}}^{\text{к}} = G_{\text{св}} c_3 t_{\text{к}}$ – теплота,

уносимая сухим веществом зерна, кДж/ч; $G_{\text{св}}$ – производительность кондиционера в расчете на сухое вещество зерна, кг/ч; c_3 – теплоемкость зерна ячменя, кДж/(кг·К), ($c_3 = 1,423$ кДж/(кг·К)); $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{к}}$ – соответственно температура поступающего и выходящего из кондиционера зерна, °С; $Q_{\text{в}}^{\text{н}} = G_{\text{в}}^{\text{н}} c_{\text{в}} t_{\text{н}}$ – теплота, вносимая влагой зерна, кДж/ч; $Q_{\text{ув}} = G_{\text{ув}} c_{\text{в}} t_{\text{окр}}$ – теплота, вносимая влагой при увлажнении зерна ($t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды) (если кроме пара в кондиционер вносится вода), кДж/ч; $Q_{\text{оп}} = D_{\text{п}} [r_{\text{п}} + c_{\text{п}} (t_{\text{с}} - t_{\text{к}})]$ – теплота, вносимая острым паром при увлажнении зерна ($D_{\text{п}}$ – расход острого пара на увлажнение зерна), кг/ч; $r_{\text{п}}$ – скрытая теплота парообразования водяного пара, определяется по таблицам теплофизических свойств воды по температуре; $c_{\text{п}}$ – теплоемкость насыщенного водяного пара; $t_{\text{к}}$ – температура насыщенного пара при рабочем давлении пара, кДж/ч; $Q_{\text{в}}^{\text{к}} = (G_{\text{ув}}^{\text{к}} + D_{\text{оп}} + G_{\text{ув}}) c_{\text{в}} t_{\text{к}}$ – теплота, уносимая влагой шрота, кДж/ч; $G_{\text{в}}^{\text{н}}$ и $G_{\text{в}}^{\text{к}}$ – соответственно количество влаги в поступающем и выходящем из кондиционера зерне $G_{\text{в}}^{\text{к}} = G_{\text{в}}^{\text{н}} - G_{\text{в}}$, кг/ч; $c_{\text{в}}$ – теплоемкость влаги $c_{\text{в}} = 4,2$ кДж/(кг·К); $r_{\text{в}}$ – скрытая теплота парообразования влаги, кДж/кг ($r_{\text{в}}$ определяется по таблицам теплофизических свойств воды по температуре; $c_{\text{в}}^{\text{н}}$ – теплоемкость паров влаги ($c_{\text{в}}^{\text{н}} = 1,94 + 0,00033t$), кДж/(кг·К); где $Q_{\text{пот}}$ – тепловые потери с поверхности кондиционера (принимаются равными в размере 3–5% от общей теплоты), кДж/ч.

Расход пара $D_{\text{п}}$, кг/ч, будет

$$D_{\text{п}} = Q / i_{\text{п}},$$

где $i_{\text{п}}$ – теплосодержание острого пара, кДж/кг.

В результате проведенных исследований и выполненного расчета была разработана оригинальная конструкция кондиционера-пропаривателя, реализующая предлагаемую технологию влаготепловой обработки зерна [11, 12].

Отличительной особенностью кондиционера-пропаривателя (рисунок 6) является более высокая производительность вследствие существенного ускорения процесса диффузии влаги внутрь зерен; возможность улучшения качества за счет повышения степени клейстеризации крахмала вследствие подобранных технологических режимов пропаривания. Технические характеристики кондиционера-пропаривателя приведены в таблице 1.

Технические характеристики кондиционера-пропаривателя

Table 1.

Technical characteristics of the air conditioner-steamer

Параметр Parameter	Значение Value
Производительность на комбикорме, т/ч Productivity on compound feed, t/h	0,8–1,6
Установленная мощность, кВт Installed power, kW	3
Расход пара, кг/ч Steam consumption, kg / h	100–150
Частота вращения лопастного вала, об/мин Blade shaft rotation frequency, rpm	342
Количество лопастей, шт. Number of blades, pcs.	26
Угол поворота лопастей, град Angle of rotation of the blades, hail	35–55
Шаг между лопастями, мм Blade spacing, mm	128
Внутренний диаметр смесительной камеры, мм Internal diameter of mixing chamber, mm	208
Длина смесительной камеры, мм The length of the mixing chamber, mm	1822
Радиальный зазор между лопастями и внутренней поверхностью смесительной камеры, мм Radial clearance between the blades and the inner surface of the mixing chamber, mm	2
Габаритные размеры Д×Ш×В, мм: Overall dimensions L×W×H, mm:	2188×322×780
Масса, кг Weight, kg	240

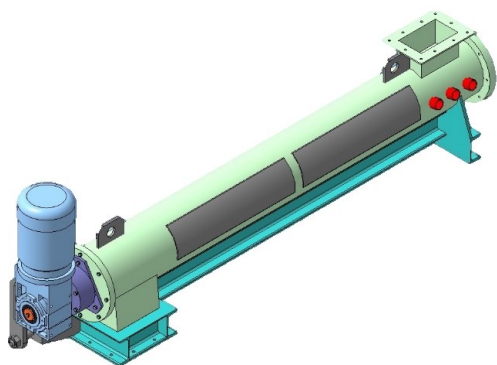


Рисунок 6. Кондиционер-пропариватель

Figure 6. Conditioning steamer

Заключение

Применение экспериментально подобранных технологических режимов пропаривания позволило увеличить производительность кондиционера-пропаривателя за счет активных гидродинамических режимов и существенного ускорения процесса диффузии влаги внутрь зерен, а также улучшить степень усвоения термообработанных зерен за счет повышения степени клейстеризации крахмала.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Пелевин А.Д., Пелевина Г.А., Венцова И.Ю. Комбикорма и их компоненты. М.: ДеЛи принт, 2008. 519 с.
- 2 Рынок комбикормов в Российской Федерации // Аграрная наука. 2018. № 6. С. 8–9.
- 3 Шаршунов В.А., Рукшан Л.В., Пономаренко Ю.А., Червяков А.В. Технология и оборудование для производства комбикормов. Часть 2. Технологическое оборудование комбикормовых предприятий. Минск, 2014.
- 4 Шаршунов В.А., Рукшан Л.В., Пономаренко Ю.А., Червяков А.В. Технология и оборудование для производства комбикормов. Часть 1. Технология комбикормов. Минск, 2014.
- 5 Афанасьев В.А. Энерго- и ресурсосберегающие технологии комбикормов. Воронеж: ВГУИТ, 2017. 473 с.
- 6 Афанасьев В.А., Остриков А.Н. Приоритетные методы тепловой обработки зерновых компонентов в технологии комбикормов. Воронеж, 2015. 336 с.
- 7 Остриков А.Н., Абрамов О.В., Прибытков А.В., Потапов А.И. Практикум по курсу «Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств»: учебное пособие. Воронеж: ВГУИТ, 2014. 204 с.

- 8 Cheevitsopon E., Noomhorm A. Effects of superheated steam fluidized bed drying on the quality of parboiled germinated brown rice // Journal of Food Processing and Preservation. 2015. V. 39. № 4. P. 349–356.
- 9 Ramachandran R.P., Bourassa J., Paliwal J., Cenkowski S. Effect of temperature and velocity of superheated steam on initial condensation of distillers' spent grain pellets during drying // Drying technology. 2017. V. 35. № 2. P. 182–192.
- 10 Bourassa J., Ramachandran R.P., Paliwal J., Cenkowski S. Drying characteristics and moisture diffusivity of distillers' spent grains dried in superheated steam // Drying technology. 2015. V. 33. № 15–16. P. 2012–2018.
- 11 Johnson P., Paliwal J., Cenkowski S. Analysing the effect of particle size on the disintegration of distiller's spent grain compacts while drying in superheated steam medium // Biosystems Engineering. 2015. V. 134. P. 105–116.
- 12 Ramachandran R.P., Akbarzadeh M., Paliwal J., Cenkowski S. Three-dimensional CFD modelling of superheated steam drying of a single distillers' spent grain pellet // Journal of food engineering. 2017. V. 212. P. 121–135.
- 13 Шамин А.Е., Заикин В.П., Игошин А.Н., Лисина А.Ю. Проблемы уборки зерна в России // Вестник НГИЭИ. 2018. № 6 (85). С. 130–138.

REFERENCES

1 Pelevin A.D., Pelevin A.G., Ventsov I.Yu. Kombikorma i ih komponenty [Feed and their components]. Moscow, DeLi print print, 2008. 519 p. (in Russian).

2 Feed market in the Russian Federation. *Agrarnaya nauka* [Agricultural science]. 2018. no. 6. pp. 8–9. (in Russian).

3 Sharshunov V.A., Rukshan L.V., Ponomarenko, Y.A., Chervyakov A.V. Tekhnologiya i oborudovanie dlya proizvodstva kombikormov. Chast' 2. Tekhnologicheskoe oborudovanie kombikormovyh predpriyatij [Technology and equipment for feed production. Part 2. Technological equipment feed enterprises]. Minsk, 2014. (in Russian).

4 Sharshunov V.A., Rukshan L.V., Ponomarenko, Y.A., Chervyakov A.V. Tekhnologiya i oborudovanie dlya proizvodstva kombikormov. Chast' 1. Tekhnologiya kombikormov [Technology and equipment for feed production. Part 1. Technology of animal feed]. Minsk, 2014. (in Russian).

5 Afanasiev V.A. Energo- i resursos-beregayushchie tekhnologii kombikormov [Energy and resource-saving technologies of compound feeds]. Voronezh, VSUET, 2017. 473 p. (in Russian).

6 Afanasiev V.A., Ostrikov A.N. Prioritetnye metody teplovoj obrabotki zernovykh komponentov v tekhnologii kombikormov [Priority methods of heat treatment of grain components in animal feed technology]. Voronezh, 2015. 336 p. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Валерий А. Афанасьев д.т.н., профессор, кафедра технологии хлебопекарных, кондитерских, макаронных и зерноперерабатывающих производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vnii_kp@gmail.ru

Александр Н. Остриков д.т.н., профессор, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, oan@vsuet.ru

Владимир В. Мануйлов к.т.н., кафедра технологии хлебопекарных, кондитерских, макаронных и зерноперерабатывающих производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, manuyllov@mail.ru

Алексей И. Александров к.т.н., кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alex-nadezhda@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 06.02.2019

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 04.03.2019

7 Ostrikov A.N., Abramov O.V., Pribitkov A.V., Potapov A.I. Praktikum po kursu "Raschet i konstruirovaniye mashin i apparatov pishchevykh proizvodstv" [Workshop on the course "Calculation and design of machines and apparatus of food production"] Voronezh, VSUET, 2014. 204 p. (in Russian).

8 Cheevitsopon E., Noomhorm A. Effects of superheated steam fluidized bed drying on the quality of parboiled germinated brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2015. vol. 39. no. 4. pp. 349–356.

9 Ramachandran R.P., Bourassa J., Paliwal J., Cenkowski S. Effect of temperature and velocity of superheated steam on initial condensation of distillers' spent grain pellets during drying. *Drying technology*. 2017. vol. 35. no. 2. pp. 182–192.

10 Bourassa J., Ramachandran R.P., Paliwal J., Cenkowski S. Drying characteristics and moisture diffusivity of distillers' spent grains dried in superheated steam. *Drying technology*. 2015. vol. 33. no. 15–16. pp. 2012–2018.

11 Johnson P., Paliwal J., Cenkowski S. Analysing the effect of particle size on the disintegration of distiller's spent grain compacts while drying in superheated steam medium. *Biosystems Engineering*. 2015. vol. 134. pp. 105–116.

12 Ramachandran R.P., Akbarzadeh M., Paliwal J., Cenkowski S. Three-dimensional CFD modelling of superheated steam drying of a single distillers' spent grain pellet. *Journal of food engineering*. 2017. vol. 212. pp. 121–135.

13 Shamin A.E., Zaikin V.P., Igoshin A.N., Lisina A.Yu. Problems of grain harvesting in Russia. *Vestnik NGIEI* [Herald NGIEI]. 2018. no. 6 (85). pp. 130–138. (in Russian).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Valery A. Afanasiev Dr. Sci. (Engin.), professor, technologies of baking, confectionery, macaroni and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, vnii_kp@gmail.ru

Alexander N. Ostrikov Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of fats, processes and devices of chemical and food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, oan@vsuet.ru

Vladimir V. Manuilov Cand. Sci. (Engin.), technologies of baking, confectionery, macaroni and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, manuyllov@mail.ru

Alexey I. Aleksandrov Cand. Sci. (Engin.), technology of fats, processes and devices of chemical and food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alex-nadezhda@mail.ru

CONTRIBUTION

All authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 2.6.2019

ACCEPTED 3.4.2019