

Имитационное моделирование параметров шнека экструдера

Михаил Геннадьевич Загоруйко¹,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Валентин Владимирович Васильчиков²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: vasilchikovvv@sgau.ru;
Ангела Канвековна Мамахай¹,
специалист, магистрант,
e-mail: mamakhaeva@mail.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, Саратов, Российская Федерация

Реферат. Экструдирование кормов обеспечивает высокое качество готового продукта. (*Цель исследования*) Повысить долговечность элементов конструкции пресс-экструдера путем оптимизации их прочностных характеристик. (*Материалы и методы*) Исследовали технологический принцип экструзии. Применили метод планирования эксперимента. Рассмотрели процесс работы пресс-экструдера со шнеком переменного шага при переработке чечевицы. Прочностные характеристики элементов пресс-экструдера проверяли в ходе проектировочного расчета или расчета на прочность. (*Результаты и обсуждение*) Показали роль основных геометрических параметров шнека экструдера – наклона витка и шага нарезки – в приготовлении качественных зерновых кормов. Выявили, что шаг витка следует рассчитывать в зависимости от коэффициента трения исходного материала о корпус пресс-экструдера, вида и свойств подаваемого материала. Определили установившиеся напряжения шнека как результат знакопостоянной нагрузки сдвига и температурных воздействий. Рассчитали мощность привода, производительность экструдера для уточнения характеристик шнека, а также гидравлическое сопротивление матричной выходной головки, расстояние технологических зон. Подтвердили, что сборная конструкция шнека, состоящая из участков с разным шагом витка, придает пресс-экструдеру универсальность. (*Выводы*) Установили, что шпонка – один из наиболее нагруженных элементов конструкции шнека пресс-экструдера. Рассчитали максимальное расчетное напряжение от постоянной нагрузки – 26,98 мегапаскаля. Определили, что напряжение в поперечном сечении шпонки при температурном воздействии составило 591 мегапаскаль, что превысило предел текучести для выбранного материала, равный 360 мегапаскалям для стали 45. В ходе экспериментальных исследований получили значение ударной вязкости, которое соответствует стандартному показателю выбранной изначально марки стали (38 килоджоулей на кубометр), но не отвечает требованиям, предъявляемым к данному элементу конструкции (не менее 50 килоджоулей на кубометр).

Ключевые слова: пресс-экструдер, экструдирование кормов, шнек переменного шага, плотность чечевицы, многофакторный эксперимент, оптимизация, имитационное моделирование.

Для цитирования: Загоруйко М.Г., Васильчиков В.В., Мамахай А.К. Имитационное моделирование параметров шнека экструдера // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 71-77. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-71-77.

Simulation of the Extruder Screw Parameters

Mikhail G. Zagoruiko¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Valentin V. Vasilchikov²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: vasilchikovvv@sgau.ru;
Angela K. Mamakhai¹,
specialist, master's student,
e-mail: mamakhaeva@mail.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov, Russian Federation

Abstract. Extrusion of feed ensures a high quality of the finished product. (*Research purpose*) To increase structural elements durability of the press extruder by optimizing their strength characteristics. (*Materials and methods*) The authors studied the

technological principle of extrusion. The experiment planning method was applied. They examined the process of press extruder operation with a variable pitch screw during the lentils processing. The strength characteristics of the press-extruder elements were checked during design or strength calculations. (*Results and discussion*) The authors showed the role of the main geometrical parameters of the extruder screw – the slope of the turn and the cutting step – in the preparation of high-quality grain feed. It was found that the turn pitch should be calculated depending on the friction coefficient of the starting material against the press-extruder body, the type and properties of the supplied material. The auger fatigue stresses were determined as a result of constant sign shear load and temperature effects. The drive power, the extruder productivity were calculated to clarify the screw characteristics, as well as the hydraulic resistance of the matrix output head, the distance of the technological zones. It was confirmed that the prefabricated screw structure, consisting of sections with different pitch, gave the press extruder versatility. (*Conclusions*) The authors found that the key was one of the most loaded structural elements of the press-extruder screw. The maximum calculated voltage from a constant load was calculated – 26.98 megapascals. It was determined that the stress in the cross-section of the key under temperature action was 591 megapascals, which exceeded the yield stress for the selected material, equal to 360 megapascals for steel 45. In the course of experimental studies, a value of impact strength was obtained that corresponded to the standard value of the initially selected steel grade (38 kilojoules per cubic meter), but didn't meet the requirements for this structural element (at least 50 kilojoules per cubic meter).

Keywords: press extruder, feed extrusion, variable pitch screw, lentil density, multifactorial experiment, optimization, simulation.

For citation: Zagoruyko M.G., Vasil'chikov V.V., Mamakhay A.K. Imitatsionnoe modelirovanie parametrov shneka ekstrudera [Simulation of the extruder screw parameters]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 71-77 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-71-77.

Экструдирование зерновых кормов обеспечивает высокое качество готового продукта [1].

Экструдер (червячный пресс) расплавляет и гомогенизирует исходный материал (рис. 1). Червячный экструдер выполняет одновременно роль пластификатора и подающего материал насоса непрерывного действия [2, 3].

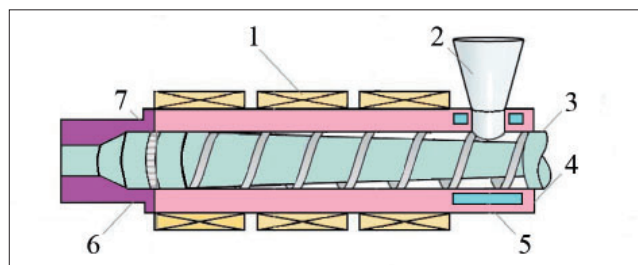


Рис. 1. Зерновой пресс-экструдер (общий вид): 1 – нагреватель; 2 – бункер; 3 – шнек; 4 – цилиндр; 5 – полость для циркуляции воды; 6 – формирующая головка; 7 – решетка с сетками
Fig 1. Grain press extruder. General view: 1 – heater; 2 – hopper; 3 – auger; 4 – cylinder; 5 – cavity for water circulation; 6 – forming head; 7 – grate with meshes

Экструдеры достаточно широко распространены в промышленности (изделия из термопластов), в сельском хозяйстве (корма), в пищевом производстве (кукурузные палочки, сухие завтраки, чипсы, диетические хлебцы, детское питание) [4, 5].

Пластификация возможна не только в результате термоэффекта передачи тепла от нагреваемого кожуха корпуса экструдера, но и от энергии, вызванной деформацией перемещаемого материала в экструдере [6, 7].

Цель исследования – повысить долговечность элементов конструкции пресс-экструдера путем оп-

тимизации их прочностных характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследование технологического принципа экструзии основано на изучении систематического перемещения материала вращающимся шнеком. Рассмотрим процесс работы пресс-экструдера со шнеком переменного шага при переработке чечевицы.

Необходимо определить шаг витка шнека с учетом некоторых допущений:

- однородность материала: он проходит вдоль оси шнека как сплошная однородная масса и перемещается на один шаг винта за один оборот;
- поперечное сечение перемещаемого материала в шнеке перпендикулярно оси шнека и считается условно постоянной по всей его длине.

Основные конструктивные параметры шнека: диаметр D , шаг витка T , глубина нарезки h , зазор между гребнем и корпусом шнека δ , угол наклона винтовой нарезки ϕ , ширина гребня e [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Одни из основных геометрических параметров шнека экструдера – наклон витка и шаг нарезки. От них существенно зависит производительность экструдера. Коэффициент трения исходного материала о корпус пресс-экструдера, вид и свойства подаваемого материала будут влиять на параметр шага витка.

При нарезке угла наклона витка шнека 45° условия должны быть идеальными. С учетом этого определяя параметр глубины нарезки:

$$h = \pi D,$$

где h – глубина нарезки, мм;

D – диаметр шнека, мм.

В расчетах коэффициент трения между шнеком и материалом примем в пределах 0,3-0,6 [8].

Шаг нарезки находится в прямой зависимости от коэффициента трения. Например, при коэффициенте трения 0,5 шаг $h = 1,1D$ [8].

Для обеспечения высокой степени сжатия материала и повышения производительности экструдера целесообразно применять шнек с переменным по длине шагом нарезки [8].

Рассмотрим параметрическое уравнение для винтовой поверхности шнека экструдера с переменным шагом (рис. 2) [8].

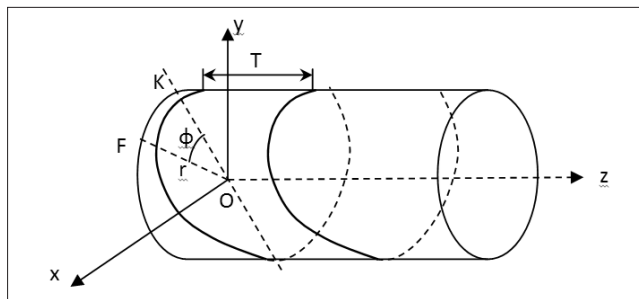


Рис. 2. Винтовая поверхность шнека с переменным шагом
 K, F – исследуемые точки; T – шаг витка; ϕ – угол поворота шнека; r – текущий радиус

Fig. 2. Spiral surface of the screw with variable pitch
 K, F – researched points; T – turn pitch; ϕ – angle of screw rotation; r – current radius

Определим шаг витка при развороте шнека экструдера на угол $\phi = 360n$:

$$T_n = aT_{n-1} = a^n b \quad (1)$$

где n – количество витков;

a – коэффициент пропорциональности;

b – первоначальный шаг витка, мм.

Примем, что T_i – шаг i -го витка (при $0^\circ T_i = b$, при повороте на $360^\circ T = ab$).

Поворот на угол $\phi = 360n$ образован между проекцией OF и осью x (рис. 2). Координаты точки K совпадают с точкой F , а перемещение вдоль продольной оси z изменяется пропорционально углу поворота ϕ и имеет вид:

$$z = CT_n,$$

где C – постоянная параметрического уравнения.

С учетом выражения (1) горизонтальное перемещение шнека примет вид:

$$z = C \cdot a^n b. \quad (2)$$

Составим уравнения винтовой линии шнека экструдера с переменным шагом:

$$x = r \cos \phi; y = r \sin \phi; z = C\phi, \quad (3)$$

где r – текущий радиус, мм.

Дополнительно можно оптимизировать прочность и долговечность как конструкции экструдера в целом, так и отдельных его элементов. Для упрощения рас-

чета воспользуемся следующим правилом: если обеспечена прочность самого слабого (нагруженного) элемента конструкции, то в целом прочность конструкции или машины можно считать обеспеченной.

Прочностные характеристики элементов пресс-экструдера проверяют в ходе проекторочного расчета или расчета на прочность [9].

Проверочный расчет на прочность предоставляет возможность исследования работы экструдера на различных материалах. Конструктивные параметры шнека устанавливают в зависимости от режима работы экструдера, градиента скорости подаваемого материала и его вида. В процессе проекторочных и проверочных расчетов получают следующие параметры: температуру и давление на выходе и входе из зоны дозирования, давление на входе и выходе в зоне питания. Расчетным путем определяют также мощность привода, производительность экструдера для выяснения характеристик шнека, гидравлическое сопротивление матричной выходной головки, расстояния технологических зон.

Проектируют и рассчитывают шнековый пресс в два этапа. Первичная цель проведения прочностного расчета – это обоснование геометрических параметров шнека, а также определение оптимальной частоты вращения исходя из заданной производительности [10].

Производительность вычисляют по формуле:

$$Q = (V \cdot 3600 \cdot \rho_T) / \gamma, \quad (4)$$

где Q – производительность шнека экструдера, кг/ч;

V – скорость вращения шнека, об/мин;

ρ_T – плотность материала, кг/м³;

γ – среднее значение градиента скорости сдвига материала (чечевицы), с⁻¹.

С учетом уравнения винтовой линии шнека экструдера (3) проводят проекторочный расчет необходимого диаметра шнека [9]:

$$Q = 0,68D^{2,5}.$$

Основная цель прочностного расчета экструдера состоит в том, чтобы найти такие оптимальные конструктивные параметры (геометрические характеристики, параметры управления), которые, наряду с прочностными характеристиками, обеспечивали бы снижение общей материалоемкости конструкции.

При проектировании шнеков не учитываются прочностные характеристики их элементов. Однако из-за продольно-поперечного изгиба оси шнека возможен преждевременный износ внешнего цилиндра пресс-экструдера (рис. 3) [9].

Прочность шнека определяют с учетом действия на его ось крутящих и изгибающих моментов.

В большинстве случаев расчет на прочность подобного вида конструкций ведется по упрощенной методике, где учитывают только деформацию от из-

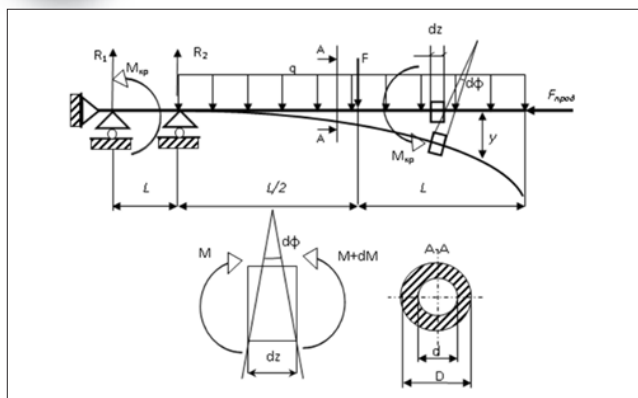


Рис. 3. Расчетная схема шнека экструдера при продольно-поперечном изгибе: R_1, R_2 – опорные реакции; $F, F_{\text{прод.}}$ – действующие усилия; $M_{\text{кр}}, M, M+dM$ – действующие моменты; $dz, d\phi$ – элементарные перемещения; d, D – внутренний и внешний диаметры; L – расстояние распределенной нагрузки

Fig. 3. Design diagram of the extruder screw with longitudinal-transverse bending: R_1, R_2 – support reactions; $F, F_{\text{прод.}}$ – acting efforts; $M_{\text{кр}}, M, M+dM$ – acting moments; $dz, d\phi$ – elementary displacements; d, D – external and internal diameters; L – distance of distributed load

гиба с кручением. Но в нашем примере возникает еще и продольная сила от давления материала при выходе из матрицы. Поэтому будем проводить расчет с учетом деформации продольного изгиба.

Воспользуемся для этого методом начальных параметров [10].

Уравнение изогнутой оси балки при продольно-поперечном изгибе имеет вид:

$$EJ_x \frac{d^2 y}{dx^2} = M_x, \quad (5)$$

где E – модуль продольной упругости, МПа;

J_x – осевой момент инерции сечения, м^4 ;

M_x – изгибающий момент относительно поперечной оси кН·м;

Уравнение изгибающего момента примет вид:

$$M_0 = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + M_x \cos kx + \frac{Q_0}{k} \sin kx, \quad (6)$$

где M_0 – начальное значение изгибающего момента, кН·м;

q – интенсивность равномерно распределенной нагрузки, кН/м;

k – коэффициент, учитывающий давление матери

ала $P, k = \sqrt{\frac{P}{EJ_x}}$;

R – опорная реакция, кН;

Q_0 – начальное значение поперечной силы, кН.

При значении текущей координаты $z = 0$ выражение для определения Q_0 примет вид:

$$Q_0 = \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL}, \quad (7)$$

где L – расстояние равно-распределенной нагрузки, м.

Выполнив проектировочный расчет с учетом вышеизложенного, получим выражение для изгибаю-

щего момента:

$$M_x = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL} \sin kx = 0. \quad (8)$$

Максимальное расчетное нормальное напряжение определим формуле [11]:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{4N(1 + \alpha^4) + \pi \gamma L^2 D(1 - \alpha^4)}{\pi D^2(1 - \alpha^4)}, \quad (9)$$

где σ_{max} – максимальное расчетное нормальное напряжение, МПа.

Касательное напряжение равно [11]:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{16 M_{\text{кр}}}{\pi D^3(1 - \alpha^4)}, \quad (10)$$

где τ_{max} – касательное напряжение, МПа;

$M_{\text{кр}}$ – Крутящий момент, кН·м.

Максимальный прогиб шнека от интенсивности распределенной нагрузки q при продольно-поперечном изгибе определяется следующим образом. Значение изгибающего момента возьмем из (6):

$$EJ_x \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL} \sin kx. \quad (11)$$

Дважды проинтегрировав, мы получим уравнение изогнутой оси шнека:

$$\begin{aligned} EJ_x \frac{d^2 y}{dx^2} &= \frac{q}{2k^2} + \frac{q}{k^4} \cos kx - q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \sin kx + \\ &+ \left[\frac{q}{k^3} \cos kL + q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \cos kL - \frac{PL}{k^2} \right] x + \\ &+ \frac{qL}{2k^2} - \frac{q}{k^4} \cos kL + q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \sin kL - \\ &- \frac{qL}{k^3} \sin kL - q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \cos kL. \end{aligned} \quad (12)$$

Максимальный прогиб оси шнека:

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{EJ} \left\{ \frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{k^2} + \frac{L^2}{2} \right) - \frac{1}{k} \left[\frac{q}{k^3} + q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \cos kL \right] - \right. \\ &- \left. \frac{1}{k^2} \left[\frac{qL}{k} - q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) \sin kL \right] \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для оценки прочностных характеристик экструдера рассмотрим самый нагруженный его узел – шнек.

Сама конструкция шнека имеет довольно сложную конфигурацию, поэтому дальнейший анализ его прочностных характеристик аналитическим методом будет недостаточно точным. Для решения задачи воспользуемся методом конечных элементов.

Для большей универсальности пресс-экструдера его шнек представляет собой сборную конструкцию, состоящую из участков с разным шагом витка. Для надежной фиксации элементов шнека на его валу применяют специальные шпонки. Они работают в условиях сложного напряженного состояния, и со временем их надо заменять. Причем замена связана с трудоемким процессом демонтажа кожуха шнека и последующей его сборкой (ГОСТ 23360-78) [12, 13].

В качестве оптимизации конструктивных параметров шнека экструдера подробнее остановимся на повышении его прочностных характеристик. Он испы-

тывает усталостные напряжения от знакопостоянной нагрузки сдвига и температурных воздействий.

В расчете шпонки учитывают напряжение среза и смятие [10]:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{Q}{A_{\text{ср}}} \leq [\tau_{\text{ср}}] \quad (14)$$

где $\tau_{\text{ср}}$ – расчетное напряжение среза в поперечном сечении, МПа;

$Q = F/n$ – поперечная сила, возникающая в этом сечении, МПа;

F – внешняя осевая нагрузка, кН;

n – число соединительных деталей, шт.;

$A_{\text{ср}}$ – площадь поперечного сечения срезаемой детали (площадь среза), м^2 ;

$[\tau_{\text{ср}}]$ – допускаемое напряжение при расчетах на срез, зависящее от материала соединительных деталей и условий работы конструкции, МПа.

Допускаемое напряжение смятия равно:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{F}{nA_{\text{см}}} \leq [\sigma_{\text{см}}]$$

где $A_{\text{см}}$ – площадь смятия, м^2 .

С учетом того, что шпонки обычно имеют фаски, выражение для определения площади смятия примет вид:

$$A_{\text{см}} = (H - t_1 - f) l_p \quad (15)$$

где H – высота шпонки, мм;

t_1 – глубина шпоночного паза на валу, мм;

$f = 0,06h$ – высота фаски, мм;

l_p – расчетная длина шпонки, мм.

При расчете на долговечность ключевым фактором станет максимальный прочностной запас.

Прочностной запас при сложном напряженном состоянии [10] вычисляют по формуле:

$$S = \frac{S_\sigma \cdot S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \geq [S], \quad (16)$$

где S – общий прочностной запас, МПа;

S_σ – прочностной запас по напряжениям нормальным (деформация от температурного воздействия), МПа;

S_τ – прочностной запас по напряжениям касательным (от сдвига), МПа;

$[S]$ – допускаемый запас прочности, МПа.

Дальнейший расчет аналитического метода будет довольно трудоемким и недостаточно точным. В данном случае применим один из численных методов – метод конечных элементов, реализованный в расчетном модуле КОМПАС 3D [14, 15].

Получили результат расчета на прочность имитационной модели шпонки методом конечных элементов (рис. 4, 5):

Для проверки сходимости результатов и подтверждения физико-механических свойств шпонки реализовали серию механических испытаний. Так как этот элемент конструкции работает в условиях дина-

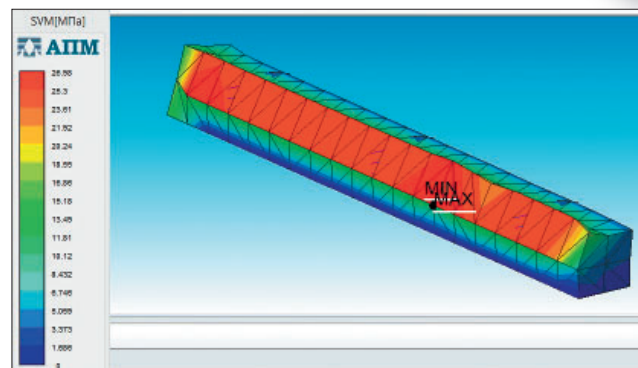


Рис. 4. Результат расчета элемента «шпонка» в условиях деформации сдвига

Fig. 4. The result of calculating the element "key" in the conditions of shear deformation

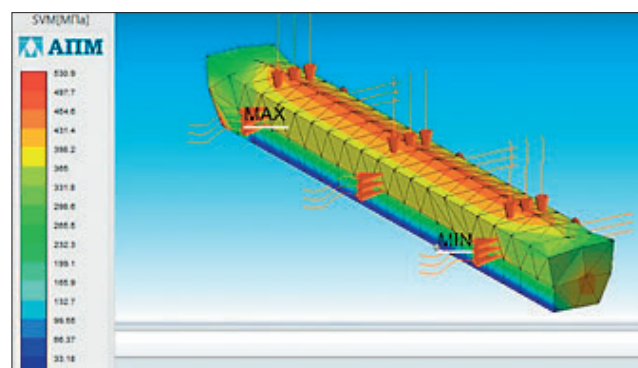


Рис. 5. Результат расчета элемента «шпонка» с учетом температурного воздействия

Fig. 5. The result of calculating the element "key" taking into account the temperature effect

мических нагрузок, то целесообразно провести механические испытания на ударную вязкость. Для этого из шпонки изготовили стандартные образцы для испытаний на маятниковом копре, определили значение ударной вязкости материала шпонки для дальнейшего сопоставления с результатами, полученными численными и аналитическим методами.

Выводы. Выявили, что шпонка – один из наиболее нагруженных элементов конструкции шнека пресс-экструдера. Максимальное расчетное напряжение от постоянной нагрузки равно 26,98 МПа. Напряжения в поперечном сечении шпонки при температурном воздействии составили 591 МПа, что превышает предел текучести для выбранного материала (360 МПа для стали 45).

Значение ударной вязкости, полученное в ходе экспериментальных исследований, соответствует стандартному значению выбранной изначально марки стали (38 кДж/м³), но не отвечает требованиям, предъявляемым к данному элементу конструкции (не менее 50 кДж/м³).

Программный численный расчет прочностных характеристик шпонки показал, что изготовление этой детали из альтернативных марок сталей (например

30ХГСА – сталь конструкционная лигированная с повышенной прочностью) позволит решить проблему с

недостаточной долговечностью этих элементов в ходе эксплуатации пресс-экструдера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрявцева З.А., Ермолаева Е.В. Проектирование производств по переработке пластмасс методом экструзии: учебное пособие к выполнению курсового и дипломного проектов. Владимир: Владимирский государственный университет. 2003. 96 с.
2. Новиков В.В., Коновалов Л.В., Иноземцева Д.В., Беляев В.В. Экспериментальное обоснование рациональных параметров модернизированного экструдера КМЗ-2,0У // *Нива Поволжья*. 2010. N4. С. 48-51.
3. Chen C., Kuang F., Tor O., Xiong Z., Zhang J. Static Lateral Load Capacity of Extruded Wood-plastic Composite-to-metal Single-bolt Connections, Considering. Failure at the Ends. *Bioresources*. 2019. Vol. 14. 8987-9000.
4. Фролов В.Ю. Теоретические и экспериментальные аспекты разработки технологий и технических средств, приготовления концентрированных кормов на основе соевого белка // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2010. 140 с.
5. Souto N., Thuillier S., Andrade-Campos A. Design of an indicator to characterize and classify mechanical tests for sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. Vol. 101. 252-271.
6. Firestein K.L., von Treifeldt J.E., Kvashnin D.G., Fernando J.F.S., Zhang C., Kvashnin A.G., Podryabinkin E.V., Shapeev A.V., Siriwardena D.P., Sorokin P.B., Golberg D. Young's Modulus and Tensile Strength of Ti3C2 MXene Nanosheets As Revealed by In Situ TEM Probing, AFM Nanomechanical Mapping, and Theoretical Calculations. *Nano Letters*. 2020. Vol. 20. 5900-5908.
7. Степин П.А. Соппротивление материалов. СПб.: Лань. 2014. 320 с.
8. Припоров И.Е. Обоснование винтовой поверхности шне-

ка переменного шага пресс-экструдера // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017. N1(63). С. 67-70.

9. Орлик О.Л. О влиянии конусности направлятеля на продвижение смеси в пресс-экструдере // *Нива Поволжья*. 2014. N3(32). С. 73-78.

10. Соколов М.В., Клинков А.С., Ефремов О.В., Беляев П.С., Однолюк В.Г. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин. М.: Машиностроение-1. 2004. 248 с.

11. Тимофеева Д.В., Попов В.П., Антимонов С.В., Зинюхина А.Г. Разработка конструкции шнека типового пресс-экструдера // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2014. N9. С. 220-225.

12. Davaze V., Vallino N., Feld-Payet S., Langrand B., Beson J. Mechanical reliability characterization of low carbon steel brazed joints with copper filler metal. Plastic and fracture behavior of a dual phase steel sheet under quasi-static and dynamic loadings. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020. Article number 107165.

13. Goger A. Modelling of counter rotating twin screw extrusion. A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree Master of Applied Science. Ontario: McMaster University. 2013. 124.

14. Дорохов А.С. Бесконтактный контроль качества запасных частей сельскохозяйственной техники // *Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина»*. 2010. N2(41). С. 73-75

15. Семейкин В.А., Дорохов А.С. Методика моделирования оценки эффективности входного контроля качества техники. *Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина»*. 2009. N8-1(39). С.30-33.

REFERENCES

1. Kudryavtseva Z.A., Ermolaeva E.V. Proektirovanie proizvodstv po pererabotke plastmass metodom ekstruzii: uchebnoe posobie k vypolneniyu kursovogo i diplomnogo proektov [Design of production facilities for the processing of plastics by extrusion: a tutorial for the implementation of course and diploma projects]. Vladimir: Vladimirskiy gosudarstvennyy universitet. 2003. 96 (In Russian).
2. Novikov V.V., Konovalov L.V., Inozemtseva D.V., Belyaev V.V. Eksperimental'noe obosnovanie ratsional'nykh parametrov modernizirovannogo ekstrudera KMZ-2,0U [Experimental substantiation of rational parameters of the modernized extruder KMZ-2.0U]. *Niva Povolzh'ya*. 2010. N4. 48-51 (In Russian).
3. Chen C., Kuang F., Tor O., Xiong Z., Zhang J. Static Lateral Load Capacity of Extruded Wood-plastic Composite-to-metal Single-bolt Connections, Considering. Failure at the Ends.

Bioresources. 2019. Vol. 14. 8987-9000 (In English).

4. Frolov V.Yu. Teoreticheskie i eksperimental'nye aspekty razrabotki tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv, prigotovleniya kotsentrirovannykh kormov na osnove soevogo belka [Theoretical and experimental aspects of the development of technologies and technical means, preparation of concentrated feed based on soy protein]. *Politematicheskij setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2010. 140 (In Russian).

5. Souto N., Thuillier S., Andrade-Campos A. Design of an indicator to characterize and classify mechanical tests for sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. Vol. 101. 252-271 (In English).

6. Firestein K.L., von Treifeldt J.E., Kvashnin D.G., Fernando J.F.S., Zhang C., Kvashnin A.G., Podryabinkin E.V., Shape-

ev A.V., Siriwardena D.P., Sorokin P.B., Golberg D. Young's Modulus and Tensile Strength of Ti₃C₂ MXene Nanosheets As Revealed by In Situ TEM Probing, AFM Nanomechanical Mapping, and Theoretical Calculations. *Nano Letters*. 2020. Vol. 20. 5900-5908 (In English).

7. Stepin P.A. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Saint-Petersburg: Lan'. 2014. 320 (In Russian).

8. Priporov I.E. Obosnovanie vintovoy poverkhnosti shneka peremennogo shaga press-ekstrudera [Substantiation of the screw surface of the variable pitch screw of the press extruder]ю *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. N1(63). 67-70 (In Russian).

9. Orsik O.L. O vliyani konusnosti napravatelya na prodvizhenie smesi v press-ekstrudere [On the influence of the taper of the guide on the movement of the mixture in the press-extruder]. *Niva Povolzh'ya*. 2014. N3(32). 73-78 (In Russian).

10. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Efremov O.V., Belyaev P.S., Odnol'ko V.G. Avtomatizirovannoe proektirovanie i raschet shnekovykh mashin [Computer aided design and calculation of screw machines]. Moscow: Mashinostroenie-1. 2004. 248 (In Russian).

11. Timofeeva D.V., Popov V.P., Antimonov S.V., Zinyukhina A.G. Razrabotka konstruktssii shneka tipovogo press ekstrudera [Development of a screw design for a typical extruder press].

Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. N9. 220-225 (In Russian).

12. Davaze V., Vallino N., Feld-Payet S., Langrand B., Beson J. Mechanical reliability characterization of low carbon steel brazed joints with copper filler metal. Plastic and fracture behavior of a dual phase steel sheet under quasi-static and dynamic loadings. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020. Article number 107165 (In English).

13. Goger A. Modelling of counter rotating twin screw extrusion. A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree Master of Applied Science. Ontario: McMaster University. 2013. 124.

14. Dorokhov A.S. Beskontaktnyy kontrol' kachestva zapasnykh chastey sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Non-contact quality control of spare parts for agricultural machinery]. *Vestnik FGOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina»*. 2010. N2(41). 73-75 (In Russian).

15. Semeykin V.A., Dorokhov A.S. Metodika modelirovaniya otsenki effektivnosti vkhodnogo kontrolya kachestva tekhniki [Modeling technique for evaluating the effectiveness of incoming quality control of equipment]. *Vestnik FGOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina»*. 2009. N8-1(39). 30-33 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 29.09.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 29.09.2020

Статья принята к публикации 26.11.2020
The paper was accepted
for publication on 26.11.2020