

Численные подходы к моделированию процесса экспандирования

Геннадий В. Алексеев	¹	gva2003@mail.ru
Максим В. Гончаров	²	goncharovmaxv@yandex.ru
Анна Г. Леу	¹	anna.leu@mail.ru
Виталий В. Кривоустов	¹	vetbel94@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,

² пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Смоленский филиал национального исследовательского университета МЭИ, Энергетический пр-т, 1, г. Смоленск, Россия

Реферат. Кормопроизводство в настоящее время переживает период интенсивного обновления и внедрения самых современных технологий и оборудования. В настоящее время все чаще применяются такие приемы как поджаривание ячменя, экструдирование зерна, пропаривание и плющение зерна, взрыв в кипящем слое, обработка инфракрасными лучами зерновых и зернобобовых компонентов с последующим плющением и однократное или двухкратное гранулирование очищенного целого зерна без увлажнения в матричных прессах с последующим измельчением гранул. Упомянутые способы требуют специальных аппаратов, машин, вспомогательного оборудования, создаваемых на базе разными способами составленных математических моделей. При поджаривании, моделируя возникающие в рабочей камере тепловые поля, обеспечивают такие условия, распада части крахмала до моносахаров, что делает зерно сладковатым на вкус, но при этом вследствие денатурации белка несколько снижаются переваримость протеина и доступность аминокислот. Зерно поджаривают в основном для молодняка животных с целью приучения их к поеданию корма в раннем возрасте, стимуляции секреторной деятельности пищеварения, лучшего развития жевательных мышц. Кроме того, высокая температура губительно действует на бактериальную обсемененность и различные виды грибов зерна, что позволяет в значительной степени избежать возможных заболеваний желудочно-кишечного тракта. Данный метод нашел широкое применение непосредственно в хозяйствах. Применяют при использовании в кормлении животных и зернобобовые: горох, сою, люпин и чечевицу. Эти корма предварительно измельчают, а затем в течение 1 ч варят или пропаривают 30–40 мин. в кормозапарнике. Такая обработка кормов позволяет инактивировать находящиеся в них антипитательные вещества, снижающие эффективность их использования. После обработки зернобобовые используют в качестве белковых добавок в количестве 25–30% от общей питательности рациона. Но рекомендуется варить и запаривать зерно хорошего качества. Недоброкачественное, длительно хранившееся и пораженное патогенной микрофлорой зерно подлежит обязательной обработке. К числу наиболее перспективных в настоящее время относят технологию экспандирования.

Ключевые слова: поджаривание ячменя, экструдирование зерна, гранулирование, математическая модель

Numerical approaches to expansion process modeling

Gennady V. Alekseev	¹	gva2003@mail.ru
Maxim V. Goncharov	²	goncharovmaxv@yandex.ru
Anna G. Leu	¹	anna.leu@mail.ru
Vitaly V. Krivopustov	¹	vetbel94@gmail.com

¹ Saint Petersburg State National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverksky av., 49, St.

² Petersburg, 197101, Russia

Smolensk branch of the national MEI research university, Energeticheskoy av. 1, Smolensk, Russia

Summary. Forage production is currently undergoing a period of intensive renovation and introduction of the most advanced technologies and equipment. More and more often such methods as barley toasting, grain extrusion, steaming and grain flattening, boiling bed explosion, infrared ray treatment of cereals and legumes, followed by flattening, and one-time or two-time granulation of the purified whole grain without humidification in matrix presses By grinding the granules. These methods require special apparatuses, machines, auxiliary equipment, created on the basis of different methods of compiled mathematical models. When roasting, simulating the heat fields arising in the working chamber, provide such conditions, the decomposition of a portion of the starch to monosaccharides, which makes the grain sweetish, but due to protein denaturation the digestibility of the protein and the availability of amino acids decrease somewhat. Grain is roasted mainly for young animals in order to teach them to eat food at an early age, stimulate the secretory activity of digestion, better development of the masticatory muscles. In addition, the high temperature is detrimental to bacterial contamination and various types of fungi, which largely avoids possible diseases of the gastrointestinal tract. This method has found wide application directly on the farms. Apply when used in feeding animals and legumes: peas, soy, lupine and lentils. These feeds are preliminarily ground, and then cooked or steamed for 1 hour for 30–40 minutes. In the feed mill. Such processing of feeds allows inactivating the anti-nutrients in them, which reduce the effectiveness of their use. After processing, legumes are used as protein supplements in an amount of 25–30% of the total nutritional value of the diet. But it is recommended to cook and steal a grain of good quality. A poor-quality grain that has been stored for a long time and damaged by pathogenic micro flora is subject to mandatory processing. Among the most promising now include the technology of expansion.

Keywords: browning of barley, grain extruding, granulation, mathematical model

Для цитирования

Алексеев Г.В., Гончаров М.В., Леу А.Г., Кривоустов В.В.
Численные подходы к моделированию процесса экспандирования
// Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 2. С. 53–60. doi:10.20914/2310-1202-2017-2-53-60

For citation

Alekseev G.V., Goncharov M.V., Leu A.G., Krivopustov V.V.
Numerical approaches to expansion process modeling. *Vestnik VGUIT*
[Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 2. pp. 53–60. (in Russian).
doi:10.20914/2310-1202-2017-2-53-60

Введение

Процессы экструдирования и экспандирования основаны на гидротермической обработке корма под давлением. Принцип действия экструдеров и экспандеров одинаков – в шнековом рабочем органе продукт разогревается, уплотняется и выпрессовывается. Однако режимы обработки существенно различаются. В экструдерах продукт разогревается только за счет трения при движении по виткам шнека и активном перемешивании под давлением. Регулирование температурного режима обработки достигается в экструдере только за счет сменных рабочих органов. Обработка комбикорма в экспандере осуществляется при более высокой влажности. Продукт разогревается за счет ввода пара и трения. При одних и тех же температурных режимах обработка в экспандере при повышенной влажности протекает в менее жестких условиях, в экструдере из-за пониженной влажности на отдельных участках местные сопротивления движению продукта могут возрасти до значительных величин, вызывая местное повышение температуры, хотя общий температурный режим остается прежним. Как в экструдерах, так и экспандерах можно за счет изменения режимов обработки получать готовый продукт различной плотности. Вместе с тем, экспандирование имеет такие преимущества, как ввод большого количества жидких компонентов – масла, жира, мелассы, устранение вредных для питания компонентов, улучшение качества и усвояемости комбикормов, более высокую производительность прессы для гранулирования, лучшее качество гранул, использование более дешевого и сложного для гранулирования сырья. Эта задача решается с применением процесса экспандирования, который известен также под названием кондиционирование под давлением.

На выходе из экспандера продукт мгновенно теряет нагрузку, а добавленная жидкость в значительной степени испаряется. Называется это молниеносным испарением, поэтому последующей сушки готового продукта в основном не требуется. За счет испарения жидкости температура падает до 90 °С. В зависимости от рецептуры, температуры продукта и давления готовый продукт может иметь структуру теста, толстых хлопьев или комков. Гранулированный экспандат сочетает в себе одновременно преимущества гранулированных и рассыпных комбикормов. Каждая частичка содержит все составные компоненты. Распределение частиц очень равномерное. Можно регулировать

размер частиц зазором в валковом измельчителе и получать рассыпной комбикорм, но без таких недостатков, как плохая текучесть и расслоение смеси. Обработка в экспандере уменьшает общую обсемененность сырья. Полностью уничтожаются колиобразные бактерии, кишечная палочка, плесневые грибки и сальмонеллы [1].

Постановка задачи.

Разница процессов экструдирования и экспандирования связана, в частности, с различием механических нагрузок, прилагаемых к единичному зерну. В процессе экструзии зерно разрушается под действием всестороннего сжатия, поскольку прохождение готового продукта через матрицу обеспечивает осевые нагрузки на материал внутри шнека. Экспандирование же осуществляемое через кольцевой зазор протекает под действием на зерно только радиальных сжимающих усилий. Соответствующая прочностная задача может быть описана следующим образом [2].

Будем считать оболочку тонкостенной, поскольку отношение наименьшего радиуса кривизны $\rho_{\min}$ к толщине δ стенки оболочки $(\rho_{\min}/\delta) > 20$ (рисунок 1). В этом случае погрешность расчета по приведенным ниже формулам не превысит 5%.

Осесимметричная оболочка нагружена наружным давлением. В этом случае напряжения в точках оболочки не зависят от угловой координаты. Форма оболочки под давлением не меняется.

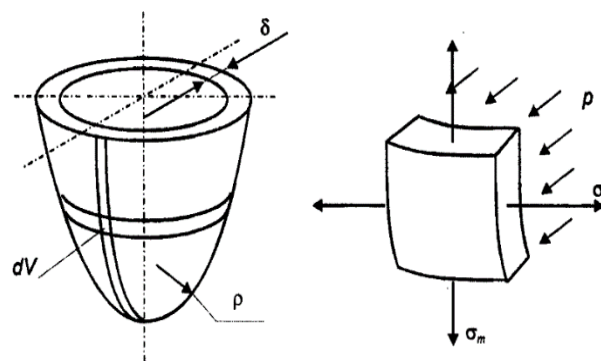


Рисунок 1. Расчетная схема тонкостенной оболочки
Figure 1. Calculation scheme of a thin-walled shell

При вырезании элемента оболочки двумя меридиональными (вдоль образующих) и двумя коническими сечениями (перпендикулярными поверхности оболочки) форма вырезанного элемента не меняется, меняются только размеры. Тогда касательные напряжения,

которые вызывают изменение формы тела, на гранях элемента отсутствуют $\tau = 0$, а нормальные напряжения σ – главные. Обозначим: σ_m – меридиональные напряжения (вдоль образующей оболочки), σ_t – тангенциальные (окружные) напряжения, σ_r – радиальные напряжения.

Как показывают практические расчеты, давление на тонкостенных оболочках, как правило, не превышает 10 атмосфер (1 МПа). При этом тангенциальные напряжения могут достигать величины $\sigma_t = 100$ МПа. Следовательно, радиальными напряжениями σ_r можно пренебречь. В таком случае тонкостенная оболочка находится в плоском напряженном состоянии и напряжения по толщине оболочки не меняются [3].

Если нормальные напряжения по толщине оболочки переменные, то результатом действия напряжений будут продольное усилие N и изгибающий момент M .

Поскольку оболочка тонкостенная, напряжения по толщине оболочки можно считать постоянными. Результатом действия напряжений в этом случае будет действовать только продольное усилие N , а изгибающий момент $M = 0$.

Рассмотрим равновесие элемента, вырезанного из оболочки двумя меридиональными и двумя коническими сечениями, перпендикулярными поверхности оболочки (рисунок 1).

На этом рисунке p – давление жидкости или газа на оболочку; ρ_m , $d\alpha_m$, σ_m – соответственно, радиус кривизны, угол охвата, элемента и нормальное напряжение в меридиональном направлении; ρ_l , $d\alpha_l$, σ_l – то же самое в тангенциальном направлении.

Спроектируем все действующие силы на нормаль n к поверхности элемента.

$$\sum F_n = p dS_l dS_m - 2\sigma_l \rho_m d\alpha_m \delta \sin\left(\frac{d\alpha_l}{2}\right) - 2\sigma_m \rho_l d\alpha_l \sin\left(\frac{d\alpha_m}{2}\right) = 0$$

$$\text{С учетом } \sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) \approx \frac{d\alpha}{2} \text{ и } dS = \rho d\alpha$$

получаем:

$$p \rho_l d\alpha_l \rho_m d\alpha_m = 2\sigma_l \rho_m d\alpha_m \delta \frac{d\alpha_l}{2} + 2\sigma_m \rho_l d\alpha_l \delta \frac{d\alpha_m}{2}$$

Разделив это выражение на произведение толщины оболочки и радиусов кривизны в тангенциальном и осевом направлениях m и l , находим окончательно уравнение связывающее важнейшие конструктивно-эксплуатационные свойства оболочки [4].

$$\frac{\sigma_l}{\rho_l} + \frac{\sigma_m}{\rho_m} = \frac{p}{\delta}$$

Уравнение такого вида называют уравнением Лапласа для тонкостенных оболочек. В записанном выражении две неизвестных величины – тангенциальное и осевое напряжения. Для того чтобы их найти необходимо второе уравнение. Его можно получить, записывая уравнение равновесия отсеченной части оболочки. Приравняем для этого сумму проекций на оси симметрии к нулю и получим [5]

$$\sum F_n = \sigma_m 2\pi r \delta \cos(\beta) - p\pi r^2 - Q = 0,$$

Отсюда

$$\sigma_m = \frac{P + Q}{2\pi r \cos(\beta)},$$

где P – проекция сил внешнего давления на ось симметрии оболочки; Q – сила возможного внутреннего давления с обратным знаком.

Полученное соотношение трудно использовать при практической оценке технологических режимов процесса в силу достаточно большого количества допущений и неопределенности некоторых входящих величин, например внутреннего давления. Эти недостатки можно преодолеть, используя численные методы решения соответствующих уравнений. В рамках такого подхода решали плоскую упругопластическую задачу для сжатия кольца двумя сосредоточенными силами, моделируя приложенные нагрузки на отдельное зерно, за счет действия радиальных усилий в канале экспандера и свободную деформацию в перпендикулярном направлении (течение через кольцевой зазор).

Результаты и обсуждение

Численный анализ решений поставленной задачи осуществляли с помощью программы, составленной в пакете прикладных программ Mathcad, используя для решения уравнения Лапласа метод конечных элементов. В силу симметрии нагрузок относительно продольной оси единичного зерна (плоского кольца) задачу решали для одной четвертой его части (рисунок 2).

Последовательно анализируя напряженно-деформированное состояние в каждой точке модели (рисунок 3), методом обратной прогонки

устанавливали общую зависимость эффективность процесса экспандирования зерна от действующих технологических параметров [6].

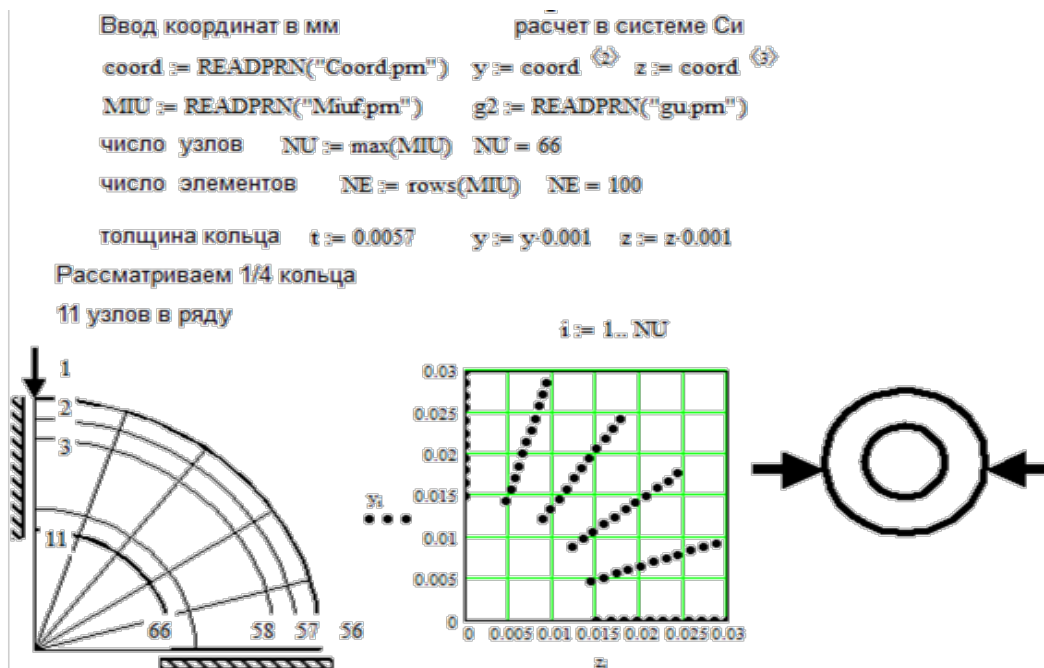


Рисунок 2. Фрагмент программы по формированию модели

Figure 2. Fragment of the program to build a model

```

Z1( $\Delta, \epsilon_i, k1$ ) := for k ∈ 1.. NE
  for i ∈ 1.. 6
     $\Delta E_i \leftarrow \Delta(\Delta E_{k,i})$ 
     $\epsilon \langle k \rangle \leftarrow A_k \cdot \Delta E$ 
     $C_p \leftarrow \begin{cases} C(E, \mu) & \text{if } k1_k = 0 \\ \text{otherwise} \\ \epsilon i1 \leftarrow \epsilon i_k \\ CCC \leftarrow CC(\epsilon i1)_1 \end{cases}$ 
     $\sigma \langle k \rangle \leftarrow C_p \cdot \epsilon \langle k \rangle$ 
  for k ∈ 1.. NE
     $\sigma_{4,k} \leftarrow \sigma_{3,k}$ 
     $\sigma_{3,k} \leftarrow \begin{cases} [\mu \cdot (\sigma_{1,k} + \sigma_{2,k})] & \text{if } NDS = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 
     $\epsilon_{4,k} \leftarrow \epsilon_{3,k}$ 
     $\epsilon_{3,k} \leftarrow \begin{cases} \left[ \frac{-\mu}{E} \cdot (\sigma_{1,k} + \sigma_{2,k}) \right] & \text{if } NDS = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 
  ( $\epsilon \quad \sigma \quad C_p$ )T

```

Рисунок 3. Один из расчетных блоков программы

Figure 3. One of the calculated blocks of the program

В процессе численного эксперимента выясняли каким образом влияют технологические режимы процесса экспандирования на его эффективность. Для этого проводили расчеты изменяя последовательно модуль упругости зерна и относительную толщину оболочки. На рисунке 4 и 5 приведены графические зависимости, характеризующие результаты расчетов. Кривые, изображенные на рисунке 4 свидетельствуют о практически неизменном характере изменения напряжений при увлажнении зерна и существенном снижении пределов текучести при сохранении экстремума в предполагаемой зоне разрушения между 10 и 15 участком в соответствии со схемой разбиения приведенной на рисунке 1. Графические зависимости рисунка 5 напротив говорят о существенном изменении характера напряженного состояния отдельных элементов поверхности зерна при уменьшении толщины оболочки, происходящей при дополнительной обработке зерна. Экстремум предела текучести также несколько меняет свое положение смещаясь ближе к зоне между 5 и 10 участком сетки конечных элементов [7–9].

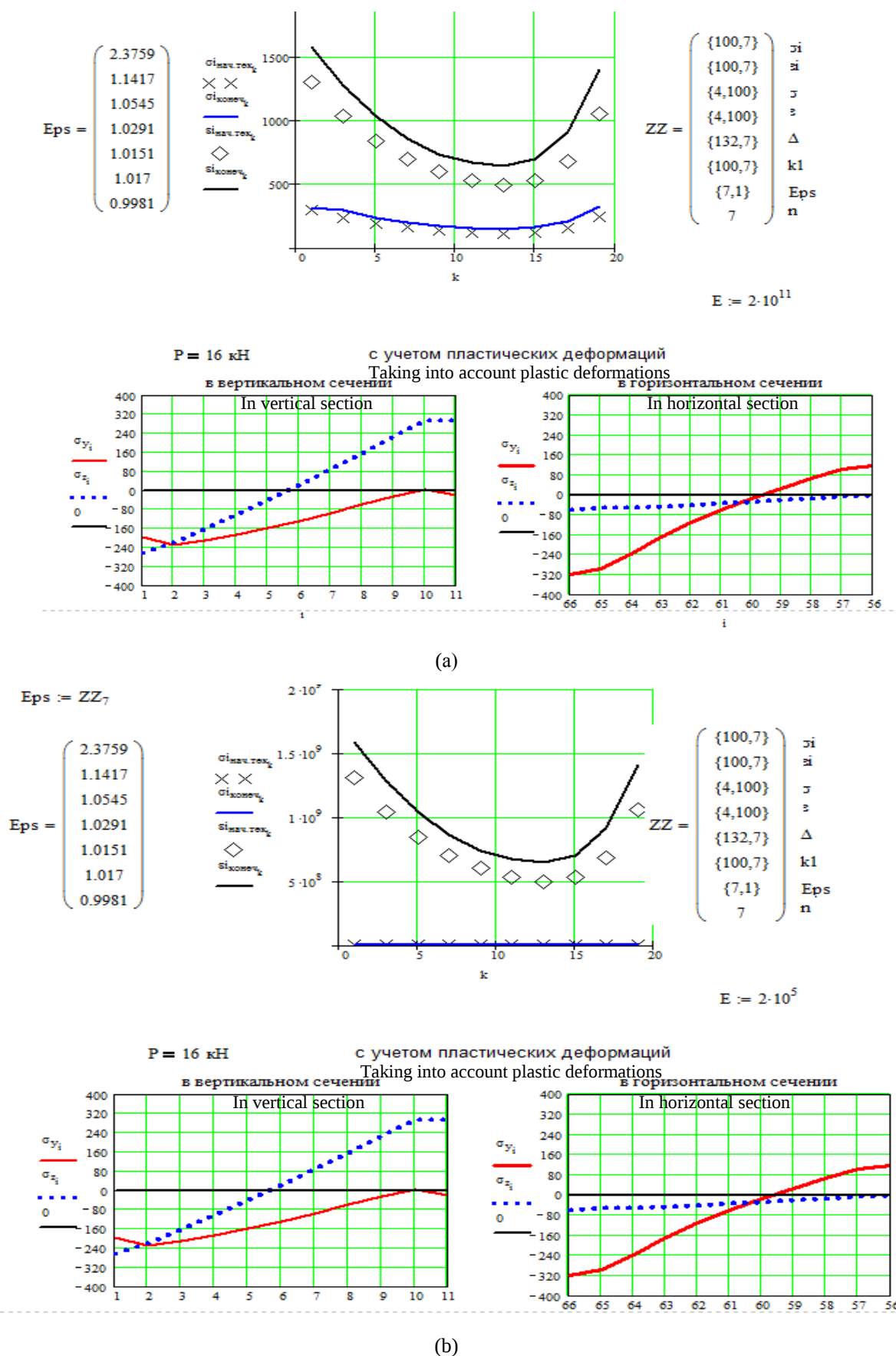


Рисунок 4. Характер изменения предела текучести при увлажнении зерна

Figure 4. The nature of the change in the yield point when the grain is moistened

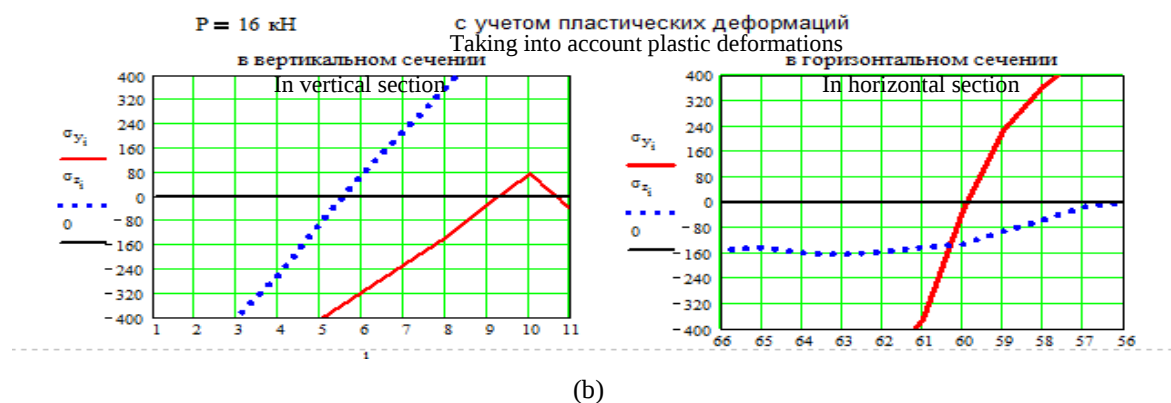
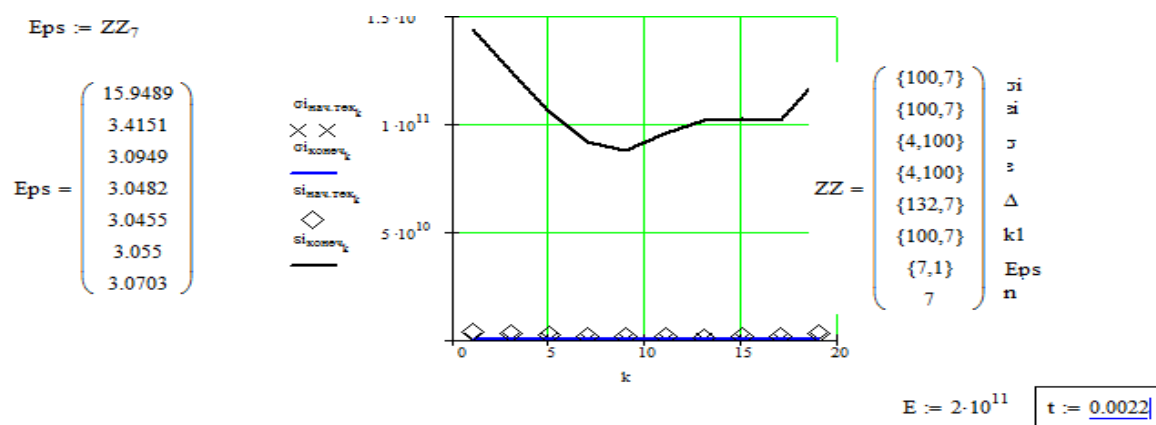
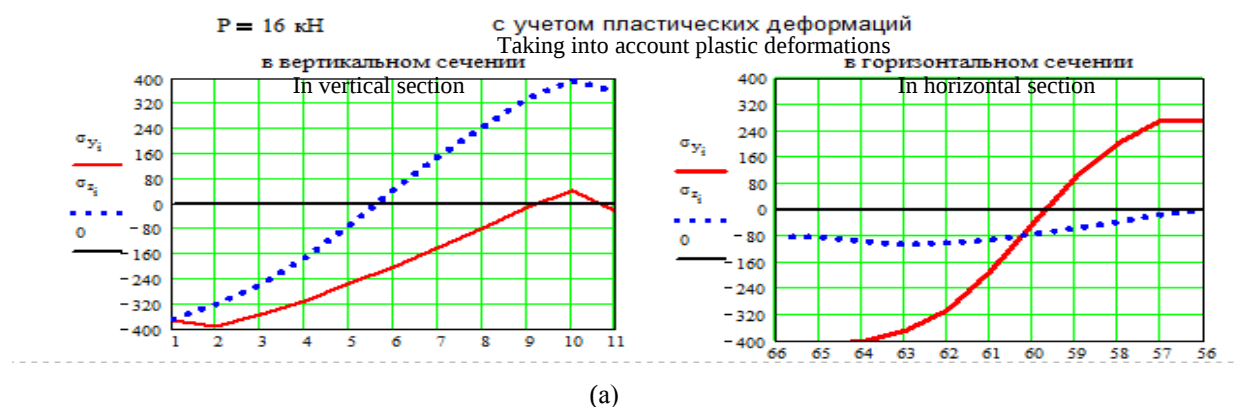
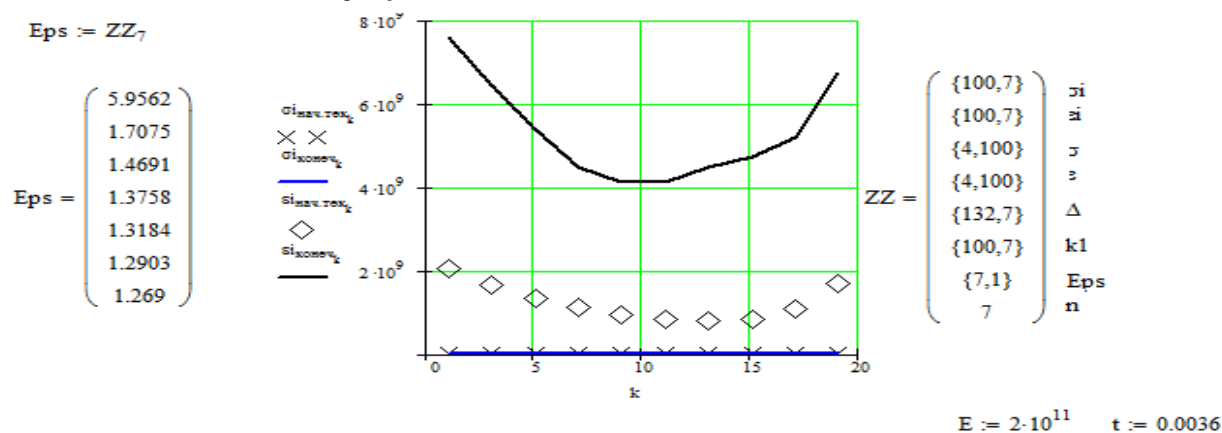


Рисунок 5. Характер изменения напряжений в слоях при дополнительной сортировке зерна

Figure 5. The nature of the change in stresses in layers with additional sorting of grain

Выводы

Проведенное моделирование процесса экспандирования зерновых культур свидетельствует о том, что его эффективность существенным образом зависит от реализуемых технологических режимов таких, как влажность (с повышением влажности падает предел текучести при разрушении оболочки зерна) и толщина оболочки зерна (дополнительная его очистка перед обработкой). При этом следует отметить, что если в первом случае принципиально ход процесса

не изменяется лишь сам он ускоряется, то во втором случае существенно меняется силовое воздействие на отдельные зерна, а, следовательно, и на рабочие элементы камеры экспандера.

Практическими выводами из анализа полученных результатов можно считать рекомендации по обеспечению особого контроля за экспандированием зерна одной сортности и прошедшего одинаковую предварительную подготовку. Такие меры позволят избежать несанкционированных нагрузок на рабочие элементы экспандеров.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Maskan M., Altan A. (ed.). Advances in food extrusion technology. CRC Press, 2011
- 2 Martre P. et al. Modelling the size and composition of fruit, grain and seed by process-based simulation models // New Phytologist. 2011. T. 191. № 3. pp. 601-618.
- 3 Аванесов В.М., Плаксин Ю.М., Стрелюхина А.Н., Ларин В.А. Применение растительных экстрактов при производстве напитков функционального назначения. Хранение и переработка сельхозсырья. 2016. № 7. С. 28–32.
- 4 Angelopoulos P. M., Gerogiorgis D. I., Paspaliaris I. Mathematical modeling and process simulation of perlite grain expansion in a vertical electrical furnace // Applied Mathematical Modelling. 2014. T. 38. №. 5. pp. 1799-1822.
- 5 Аванесов В.М., Плаксин Ю.М., Стрелюхина А.Н., Ларин В.А. Исследование предварительного электроконтактного нагрева при экстрагировании из сухого растительного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 11. С. 23–27
- 6 Verboloz E., Voronenko B., Pastukhov A., Alekseev G., Pelenko V., Polyakov S. Mathematical modelling of the separation of emulsions through membranes // International Journal for Engineering Modelling. 2014. T. 27. № 3–4. С. 131–135.
- 7 Turner B., Strong R., Gold S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling // Rapid Prototyping Journal. 2014. T. 20. №. 3. С. 192-204.
- 8 Oke M. O., Awonorin S. O., Workneh T. S. Expansion ratio of extruded water yam (*Dioscorea alata*) starches using a single screw extruder // African Journal of Agricultural Research. 2013. T. 8. №. 9. С. 750-762.
- 9 Алексеев Г.В., Егошина Е.В., Башева Е.П., Верболюз Е.И., Боровков М.И. Оценка конкурентоспособности инновационного технического решения // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. 2014. № 4. С. 137–146.
- 10 Афанасьев В.А., Джабаев Ю.А. Оценка эффективности производства и использования экспандированных комбикормов // Вестник ВГУИТ. 2016. № 3 (69). С. 313–320.

REFERENCES

- 1 Martre P. et al. Modelling the size and composition of fruit, grain and seed by process-based simulation models. New Phytologist. 2011. vol. 191. no. 3. pp. 601-618.
- 2 Maskan M., Altan A. (ed.). Advances in food extrusion technology. CRC Press, 2011.
- 3 Avanesov V.M., Plaksin Yu. M., Strelyukhi-na A.N., Larin V.A. Use of vegetable extracts by production of drinks of functional purpose. *Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya* [Storage and processing of agricultural raw materials]. 2016. no. 7. pp. 28–32.
- 4 Angelopoulos P. M., Gerogiorgis D. I., Paspaliaris I. Mathematical modeling and process simulation of perlite grain expansion in a vertical electrical furnace. Applied Mathematical Modelling. 2014. vol. 38. no. 5. pp. 1799-1822.
- 5 Avanesov V.M., Plaksin Yu. M., Strelyukhi-na A.N., Larin V.A. Study of preliminary electrocontact heating at extraction from dry vegetable raw materials. *Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya* [Storage and processing of agricultural raw materials]. 2015. no. 11. pp. 23–27
- 6 Verboloz E., Voronenko B., Pastukhov A., Alekseev G., Pelenko V., Polyakov S. Mathematical modeling of the separation of emulsions through membranes. [International Journal for Engineering Modelling]. 2014. vol. 27. no. 3–4. pp. 131–135.
- 7 Turner B., Strong R., Gold S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Rapid Prototyping Journal. 2014. vol. 20. no. 3. pp. 192-204.
- 8 Oke M. O., Awonorin S. O., Workneh T. S. Expansion ratio of extruded water yam (*Dioscorea alata*) starches using a single screw extruder. African Journal of Agricultural Research. 2013. vol. 8. no. 9. pp. 750-762.
- 9 Alekseev G.V., Egoshina E.V., Basheva E.P., Verboloz E.I., Borovkov M.I. Assessment of competitiveness of innovative technical solutions. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Ekonomika i ekologicheskii menedzhment* [The scientific journal ITMO. Series: Economics and environmental management]. 2014. no. 4. pp. 137–146. (in Russian).
- 10 Afanas'ev V.A., Dzhabaev Yu.A. Evaluation of the effectiveness of the production and use of feed expanded. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2016. no. 3 (69). pp. 313–320. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Геннадий В. Алексеев д.т.н., профессор, кафедра процессы и аппараты пищевых производств, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, пр-т Кронверкский, 49, г Санкт-Петербург, 197101, Россия, gva2003@mail.ru

Максим В. Гончаров к.т.н., зав. кафедрой, кафедра технологические машины и оборудование, Смоленский филиал национального исследовательского университета МЭИ, Энергетический пр-т, 1, г. Смоленск, Россия, goncharovmaxv@yandex.ru

Анна Г. Леу магистрант, кафедра процессы и аппараты пищевых производств, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, пр-т Кронверкский, 49, г Санкт-Петербург, 197101, Россия, anna.leu@mail.ru

Виталий В. Кривопустов магистрант, кафедра процессы и аппараты пищевых производств, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, пр-т Кронверкский, 49, г Санкт-Петербург, 197101, Россия, vetbel94@gmail.com

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 11.04.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 18.05.2017

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Gennady V. Alekseev doctor of technical sciences, professor, processes and devices of food productions department, Saint Petersburg State National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverksky av., 49, St. Petersburg, 197101, Russia, gva2003@mail.ru

Maxim V. Goncharov candidate of technical sciences, head of department, technological machines and equipment department, Smolensk branch of the national MEI research university, Energeticheskyy av. 1, Smolensk, Russia, goncharovmaxv@yandex.ru

Anna G. Leu master student, processes and devices of food productions department, Saint Petersburg State National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverksky av., 49, St. Petersburg, 197101, Russia, anna.leu@mail.ru

Vitaly V. Krivopustov master student, processes and devices of food productions department, Saint Petersburg State National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverksky av., 49, St. Petersburg, 197101, Russia, vetbel94@gmail.com

CONTRIBUTION

All authors equally took part in writing the manuscript and are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 4.11.2017

ACCEPTED 5.18.2017