



ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ КУКУРУЗНЫХ КРАХМАЛОВ

Геннадий Валентинович Алексеев¹, Алексей Петрович Савельев²,
Артем Андреевич Бирченко³, Елена Николаевна Ивлева⁴

^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹ gva2003@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2867-108X>

² savelevalexey30111983@gmail.com

³ syzrantsev.dmitriy83@mail.ru

⁴ helen-ivleva@yandex.ru

Аннотация. Основной представитель углеводов, составляющих более 70 % рациона питания человека – крахмал. Это вещество считается наиболее важным из резервов углеводных соединений растительного сырья. Его называют самым широко известным питательным растительным веществом. Продукты, получаемые из него или на его основе, играют основную роль в производстве потребительских товаров. Это продукты широко распространены не только в пищевой промышленности при приготовлении кондитерских, хлебобулочных или пищекокцентратных изделий, но с успехом применяются и в таких сферах как производство полиграфической, кожевенной или фармацевтической продукции. Незаменяем он и на производствах консервных, молочных- и мясообрабатывающих предприятий. Только номенклатура изделий крахмалопаточного производства насчитывает сотни наименований и непрерывно расширяется. В качестве основного сырья при получении крахмала и крахмалпродуктов используют большое количество культур, заметное место среди которых занимает кукуруза. Помимо нативного крахмала выпускается большой ассортимент декстринов и модифицированных крахмалов. Зерна крахмала состоят, как известно, из двух фракций: амилозы и амилопектина. Содержание амилозы в промышленных сортах кукурузы колеблется в пределах около 20 %, амилопектина – 80 %. Некоторые сорта кукурузы содержат до 70 % амилозы. Одним из наиболее прогрессивных способов получения модифицированных крахмалов, допускаемых в применении на производствах продуктов питания практически без ограничений, является способ экструзии. В большинстве видах экструзии стремятся создать такие условия работы оборудования, которые способствовали бы возможно полной деструкции крахмальных зерен. При возможности сортового разделения для прочих равных условий более полно деструктируют зерна крупных размеров, а мелкие зерна в тех же условиях разрушаются не так интенсивно. Процессы разрушения крахмальных зерен находятся в большой зависимости от типа и содержания в общей массе модифицирующих добавок. Наличие, например, в экструдруемой смеси различных жировых компонент или белковых соединений уменьшают воздействие одних крахмальных зерен на другие и препятствуют непосредственному трению их о лопасти шнека. Это часто приводит к снижению степени вспучивания получаемого продукта. Таким образом, подбор состава смеси в каждом случае индивидуален и требует выбора рациональных режимов осуществления процесса экструзии. В настоящей работе предлагается модель экструдирования с интенсификацией осевого перемещения сырья для получения модифицированного кукурузного крахмала. Предложенная конструкция экструдера позволяет получить продукт с большим диапазоном задаваемых потребительских свойств.

Ключевые слова: уточнение модели, экструзионная обработка, кукурузный модифицированный крахмал, осевое перемещение сырья, перфорирование витков шнека.

Для цитирования: Алексеев Г.В., Савельев А. П., Бирченко А. А., Ивлева Е. Н. Возможности повышения качества экструдированных кукурузных крахмалов // Ползуновский вестник. 2024. № 3. С. 55 – 61. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.008, EDN: <https://elibrary.ru/QXYLOC>.

Original article

POSSIBILITIES OF IMPROVING QUALITY OF EXTRUDED CORN STARCHES

Gennady V. Alekseev¹, Alexey P. Saveliev², Artyom A. Birchenko³,
Elena N. Ivleva⁴

^{1, 2, 3, 4} ITMO National Research University, St. Petersburg, Russia

¹ gva2003@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2867-108X>

² savelevalexey30111983@gmail.com

³ syzrantsev.dmitriy83@mail.ru

⁴ helen-ivleva@yandex.ru

Abstract. Starch is the main representative of carbohydrates that make up more than 70% of the human diet. This substance is considered the most important of the reserves of carbohydrate compounds of vegetable raw materials. It is called the most widely known plant nutrient. Products derived from it or based on it play a major role in the production of consumer goods. These products are widely used not only in the food industry in the preparation of confectionery, bakery or food concentrate products, but are also successfully used in such areas as the production of printing, leather or pharmaceutical products. It is also indispensable in the production of canning, dairy and meat processing enterprises. Only the product range of starch and treacle production has hundreds of names and is continuously expanding. A large number of crops are used as the main raw material for the production of starch and starch products, among which corn occupies a prominent place. In addition to native starch, a wide range of dextrans and modified starches are available. Starch grains are known to consist of two fractions: amylose and amylopectin. The content of amylose in industrial varieties of corn ranges from about 20%, amylopectin – 80%. Some varieties of corn contain up to 70% amylose. One of the most advanced methods for producing modified starches, which can be used in food production with almost no restrictions, is the extrusion method. In most types of extrusion, they strive to create such working conditions of the equipment that would contribute to the possible complete destruction of starch grains. If varietal separation is possible, for other equal conditions, large grains are more completely destroyed, and small grains are not destroyed so intensively under the same conditions. The processes of destruction of starch grains are highly dependent on the type and content of modifying additives in the total mass. The presence, for example, of various fatty components or protein compounds in the extruded mixture reduces the effect of some starch grains on others and prevents them from directly rubbing against the screw blades. This often leads to a decrease in the degree of swelling of the resulting product. Thus, the selection of the composition of the mixture is individual in each case and requires the choice of rational modes of the extrusion process. In this paper, we propose an extrusion model with an intensification of the axial movement of raw materials to produce modified corn starch. The proposed design of the extruder allows you to obtain a product with a wide range of specified consumer properties.

Keywords: model refinement, extrusion processing, corn modified starch, axial movement of raw materials, perforation of screw turns.

For citation: Alekseev, G. V., Saveliev, A. P., Birchenko, A. A. & Ivleva, E. N. (2024). Possibilities of improving quality of extruded corn starches. *Polzunovskiy vestnik*. (3), 55-61. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.03.008. EDN: <https://elibrary.ru/QXYLOC>.

ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературная экструзия, реализуемая с технологическими параметрами процесса: влажность массы – 14–20 %, давление – 12–20 Мпа, ведет к вспучиванию получаемого продукта сразу же после выхода его из отверстий фильеры за счет практически мгновенного снижения основных действующих параметров, таких как давление и температура, при одновременном резком превращении воды в водяной пар. В случае использования такого типа процесса показателем, который определяет основные закономерности экструзии и качество получаемого продукта тесно связан с вязкостью экструдированной смеси. Интенсивность и глубина разрушения крахмальных зерен в этом случае определяет эффективность реализуемого технологического процесса и совершенство используемого технологического оборудования. При высокотемпературной экстру-

зии процесс происходит достаточно быстро при этом получаемый продукт оказывается достаточно хорошо высушенным.

В производстве широкого ассортимента пищевых продуктов новые возможности представляет технология варочной экструзии из-за высокой экономичности и универсальности процесса. Экструзия сопровождается воздействием на материал высокого давления, температуры, срезающих усилий. При этом можно использовать разнообразное крахмалсодержащее сырье. При изготовлении пищевых продуктов варочной экструзией, кроме традиционного крахмалсодержащего сырья (картофель и кукуруза), все большее применение получает переработка высокобелкового сырья (мясного и рыбного). Этот способ экструзии часто используют для получения мясо- и рыборастворительных продуктов. При прессовании происходит объемная деформация, которая характеризуется сдвигом

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ КУКУРУЗНЫХ КРАХМАЛОВ

и сжатием исходного продукта. Первоначально под воздействием приложенного давления на продукт резко изменяется его плотность и образуется сплошная однородная структура с максимальным уплотнением. Затем при резком увеличении давления наблюдается уже незначительное повышение плотности.

Материал, перемещающийся под давлением в канале экструдера, деформируется, приобретает новую форму при продавливании через матрицу. При этом в результате действия напряжения сдвига происходит резкий перепад давления. Это давление действует в двух противоположных направлениях: в сторону матрицы и реактивно в сторону приемной зоны. Происходит выпрессовывание материала из экструдера через отверстие матрицы. В результате резкого перепада давления и температуры мгновенно испаряется влага из обрабатываемого материала. Материал при этом приобретает высокопористую структуру и свойства. Оптимальное рабочее давление при прессовании устанавливается опытным путем с учетом свойств материала, количества и качества получаемой или имеющейся фазы.

В экструзионных процессах важную роль играют явления тепло- и массопереноса. С повышением температуры в экструдере увеличивается теплоемкость пищевых продуктов. Повышение температуры влияет на перенос влаги внутри материала. При добавлении влаги к исходному продукту, имеющему небольшую влажность, линейно возрастает эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эфф}$. Влияние влажности на $\lambda_{эфф}$ обусловлено степенью дисперсности исходного материала (крупно-, средне- и мелкодисперсные). Так, при добавлении влаги к относительно сухому продукту, $\lambda_{эфф}$ возрастает с увеличением размера частиц продукта. При большой влажности продукта рост $\lambda_{эфф}$ постепенно приостанавливается (для крупнозернистого), или остается линейным (для среднелдисперсного), или темп его резко возрастает (для мелкодисперсного) продукта.

На величину $\lambda_{эфф}$ влияют формы связи влаги с материалом. Если продукт имеет небольшую влажность, то вначале процесса влага заполняет мелкие поры между зёрнами. Имеет место молярный перенос пара (при горячей экструзии) внутрь пор (мономолекулярная адсорбция). При их насыщении влага заполняет все межзерновые поры, полностью насыщая их (капиллярная конденсация). С влагосодержанием материала тесно связаны как коэффициент теплопроводности, так и температуропроводности.

Повышение температуры изменяет форму связи влаги с материалом. Влагоинерционные свойства материала, оказывающие наибольшее влияние на интенсивность переноса и равномерность распределения влаги внутри материала в процессе его термической обработки, ха-

POLZUNOVSKIY VESTNIK № 3 2024

рактеризуются коэффициентом диффузии влаги. При экструдировании следует обеспечить оптимизацию режима с учетом всех факторов.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись процесс и технологическое оборудование экструдирования кукурузного сырья для получения из него модифицированного пищевого крахмала.

Поскольку технологические параметры самого процесса экструдирования определяются качеством перерабатываемого сырья и, в первую очередь, его структурно-механическими характеристиками, изучали микроструктуру крахмальных зёрен, подлежащих разделению на амилозу и амилопектин для обеспечения придания ему новых потребительских свойств (модифицирования).

Для анализа морфологии крахмальных гранул, как основы структуры, изучали их размеры, форму и особенности строения поверхности. Эти исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа. После изготовления препаратов образцов крахмала в виде порошка наносили их на металлическую подложку, прикрепляли к ее поверхности посредством токопроводящего клея и размещали на приборном столе микроскопа LEO 1420, фирмы Carl Zeiss, Германия (рис. 1) [1–3].

Результаты электронного сканирования подготовленных образцов приведены на рисунке 2.



Рисунок 1 – Сканирующий электронный микроскоп LEO 1420

Figure 1 – LEO 1420 scanning electron microscope

Анализ гранулометрического состава зёрен различных видов сырья позволяет судить о том, что они существенно разнятся по размерам и форме.

Нетрудно предположить, что такие различия в процессе экструдирования будут создавать различные условия для высвобождения амилозы и амилопектина из различных зёрен. Велика вероятность того, что наиболее крупные зёрна, перемещаясь вдоль поверхности лопастей экструдера в радиальном направлении, будут подвергаться разрушению с выделением амилопектина и амилозы для последующего модифицирования, тогда как мелкие зёрна крахмала так и останутся неразрушенными.

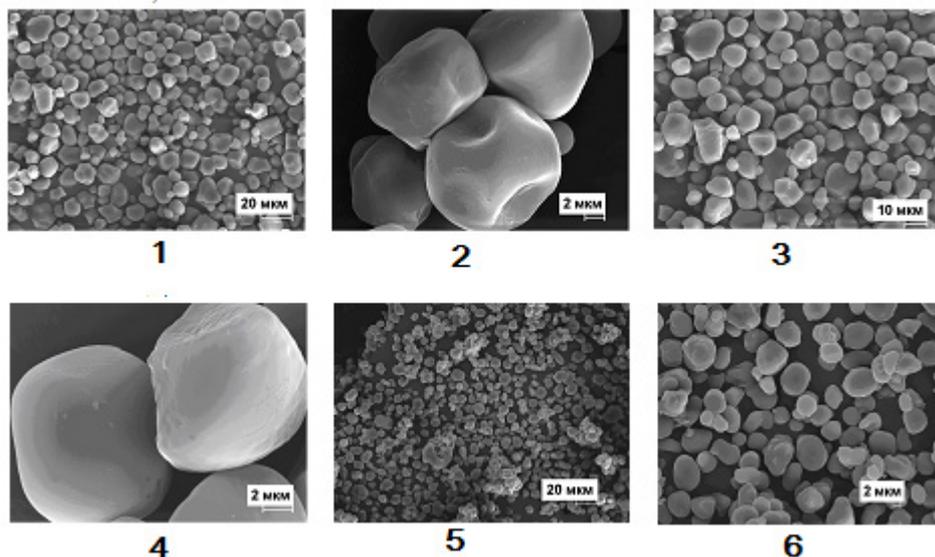


Рисунок 2- Микрофотографии зерен кукурузного крахмала: 1-4 – кукурузного крахмала; 5-6 – высокоамилозного кукурузного крахмала

Figure 2- Micrographs of corn starch grains: 1-4 – corn starch; 5-6 – high-amylose corn starch

Ситуация может быть изменена за счет обеспечения перемещения более мелких зерен в осевом направлении путем их «продавливания», например, через перфорацию лопастей. При этом легко контролировать размер зерен, нуждающихся в таких дополнительных мерах разрушения путем изменения диаметров отверстий.

Известно [4], что осевое перемещение v_z экструдруемого продукта определяется уравнением (1):

$$v_z = \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{2\eta_0} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{n+1}{n}} + C_2 \quad (1)$$

где n – индекс течения, определяющий неньютоновское поведение экструдруемой массы;

P – давление;

η_0 – вязкость;

r – текущий радиус.

Предположим, что в конструкцию шнека внесены некоторые изменения с целью возможного регулирования скорости движения продукта, например, выполнено k отверстий диаметром d_0 , параметры которых не сказываются на принятых допущениях движения расплава.

В этом случае выражение (1) принимает вид:

$$v_z = \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{2\eta_0} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{n+1}{n}} + \left(\frac{k d_0 r^2}{2} \right) + C_2$$

Для определения константы C_2 составляли уравнение $v_z(R) = 0$.

После подставления в уравнение (1) численного значения C_2 , оно принимало следующий вид:

$$v_z = -\frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{2\eta_0} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{n+1}{n}} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] - \left(\frac{k d_0 R^2}{2} \right) \left[1 - \left(\frac{r^2}{R^2} \right) \right] \quad (2)$$

Скорость перемещения среды вдоль оси трубы v_0 , после подстановки $r=0$ в уравнение (2), определялась выражением:

$$v_0 = -\frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{\eta_0} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{n+1}{n}} - \left(\frac{k d_0 R^2}{2} \right)$$

В этом случае уравнение распределения скоростей представляло вид:

$$v = v_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]$$

При получении распределения температуры, пользовались зависимостями, приведенными в [3]. Однократно интегрируя, окончательно получали:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{\eta_0}{k} \frac{n}{3n+1} A \left(\frac{1}{2\eta_0} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{n+1}{n}} r^{\frac{2n+1}{n}} + \frac{C_3}{r} \quad (3)$$

Поскольку градиент температуры на оси трубы равен нулю в уравнении (3) постоянная C_3 тоже равна нулю. Интегрируя записанное соотношение (3), имеем:

$$T = -\frac{\eta_0}{k} \left(\frac{n}{3n+1} \right)^2 A \left(\frac{1}{2\eta_0} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{n+1}{n}} r^{\frac{3n+1}{n}} + C_4 \quad (4)$$

Для определения C_4 решали начальное уравнение $T(R)=T_w$, где T_w – температура внутренней стенки. Из выражения (4) при этом условии находим:

$$T - T_w = \frac{\eta_0}{k} \left(\frac{n}{3n+1} \right)^2 A \left(\frac{1}{2\eta_0} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{n+1}{n}} R^{\frac{3n+1}{n}} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{3n+1}{n}} \right] \quad (5)$$

Поскольку, с другой стороны, записанное соотношение является разностью температур экструдруемой среды на оси и на стенке, то подстановкой $r=0$ в уравнение (5), определяем,

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ КУКУРУЗНЫХ КРАХМАЛОВ

что эта разность может быть записана в виде:

$$T_0 - T_w = \frac{\eta_0}{k} \left(\frac{n}{3n+1} \right)^2 A \left(\frac{1}{2\eta_0} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^{\frac{n+1}{n}} R^{\frac{3n+1}{n}}$$

Окончательно, уравнение (5) перепишем в форме:

$$\frac{T - T_w}{T_0 - T_w} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{3n+1}{n}}$$

Полученное соотношение в совокупности с выражением для v определяет основные закономерности моделируемого процесса.

Полученные результаты моделирования проанализированы с точки зрения возможности их реализации в виде технического решения [5].

Основной задачей такого технического решения является повышение равномерности распределения ингредиентов и перемешивания экструдруемой смеси в объеме корпуса, что обеспечивает более интенсивное измельчение кукурузного зерна с разделением его на амилозу и амилопектин при получении модифицированного крахмала, в том числе при наличии химически инертного реагента (например, перманганата калия). Это ведет к получению готового продукта с повышенной прочностью создаваемого геля, более эффективному формированию оболочки и исключению разрушения изготавливаемых гранул.

Получаемый эффект от применения такого технического решения состоит в том, что наличие перфорированных и сплошных витков шнековой нарезки обеспечивает не только радиальное, но и осевое движение экструдруемой смеси. Кроме того, такое перемешивание при перемещении смеси через перфорацию дополнительно измельчает входящие в смесь ингредиенты и обеспечивает их более равномерное размещение в объеме корпуса и более интенсивное взаимодействие. Влага, остающаяся при реализуемом процессе, отводится из кольцевого зазора.

Возможность решения поставленной задачи обуславливается тем, что в шнековом экструдере, четные лопасти винтовой нарезки шнека, отсчитывая со стороны матрицы, выполняют перфорированными с равномерно распределенными отверстиями, оси которых параллельны оси вала шнека, а диаметры равны 0,05-0,06 диаметра лопасти винтовой нарезки, причем кольцевой зазор, для установки матрицы, снабжают отводом для излишков влаги выделяемой из экструдруемого сырья.

Такое исполнение шнека поясняется рисунке 3, на котором представлено продольное сечение шнекового экструдера предлагаемой конструкции, со сплошной и перфорированной лопастями цилиндрической нарезки.

Шнековый экструдер состоит из корпуса 1, внутри которого установлен шнек 2, соединенный с приводом 3, загрузочного устройства 4 и матрицы 5, закрепленной в кольцевом зазоре 6, между концом шнека и внутренней стенкой корпуса. Винтовая нарезка выполнена в виде лопа-

стей, причем ее четные лопасти 7, отсчитываемые со стороны матрицы, выполнены перфорированными с равномерным распределением отверстий. Оси выполненных отверстий параллельны оси вала шнека, а диаметры их равны 0,05-0,06 диаметра лопасти винтовой нарезки. Нечетные лопасти 8 являются сплошными, причем первая из них примыкает к кольцевому зазору для установки матрицы, снабженному отводом для удаления излишков влаги, выделяемой из экструдруемого сырья.

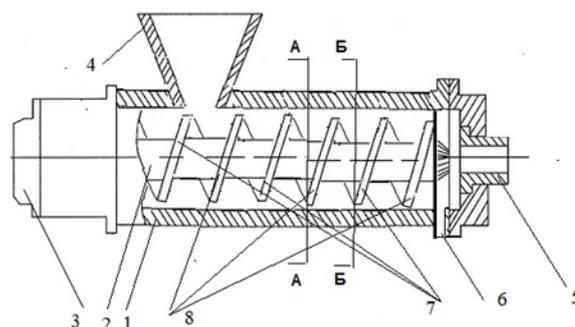


Рисунок 3 – Усовершенствованный шнековый экструдер

Figure 3 – Advanced screw extruder

Шнековый экструдер работает следующим образом: продукт, например, измельченная кукуруза, при необходимости смешанная с химическим реагентом, преимущественно раствором перманганата калия, через загрузочное устройство 4 поступает в корпус 1, где шнек 2 соединенный с приводом 3 транспортирует его в сторону матрицы 5. Винтовая нарезка шнека представляющая последовательно чередующиеся четные перфорированные лопасти 7 и сплошные нечетные лопасти 8, последними в процессе транспортирования давит на продукт в направлении оси шнека и за счет наклона лопастей заставляет его сдвигаться между соседними лопастями перемешиваться в радиальном направлении. Четные перфорированные лопасти 7 в это же самое время, за счет возникающей силы давления, обеспечивают через перфорацию еще и возможность перемещения части материала в осевом направлении, вдоль оси шнека, подвергая материал дополнительному измельчению. Это позволяет более равномерно по объему корпуса перемешивать экструдруемый материал, обеспечивая более эффективное взаимодействие частиц кукурузы с химическим реагентом. Излишки влаги удаляются из кольцевого зазора 6 через отвод при прохождении экструдруемого сырья по направлению к матрице.

Предлагаемая конструкция шнекового экструдера позволяет повысить эффективность производства модифицированных крахмалов, поскольку обеспечивает более равномерное

измельчение и перемешивание экструдруемой смеси. Это, в частности, при производстве модифицированных крахмалов из кукурузы создает более благоприятные условия для взаимодействия ингредиентов смеси при расщеплении связей с образованием амилозы и амилопектина с последующим их модифицированием.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Авторами на основании проведенных реологических исследований [6-8] выявлено, что особенности течения сред, с использованием крахмалсодержащей основы или составы со значительным наличием разного рода крахмалов при воздействии повышенных давлений и значительных температур, как правило, подчиняются степенному закону Оствальда-де-Вилля, а сами среды относятся к аномально-вязким жидкостям:

$$\tau = m\dot{\gamma}^n$$

где: τ – напряжение сдвига, Па, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} , m – параметр консистенции, $\text{Па}\cdot\text{с}^n$, n – индекс течения.

Указанные соображения были положены в основу обработки экспериментальных данных для среды проходящей предматричную зону предложенной конструкции экструдера.

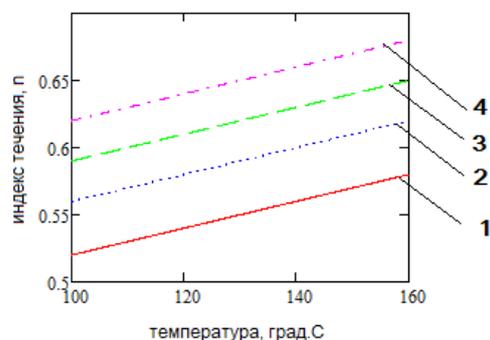


Рисунок 4 – Изменение индекса течения в предматричной зоне при первоначальной влажности смеси: линия 1 – 12 %; линия 2 – 14 %; линия 3 – 16 % и линия 4 – 18 %

Figure 4 – Change in the flow index in the pre-matrix zone at the initial humidity of the mixture: line 1 – 12 %; line 2 – 14 %; line 3 – 16 % and line 4 – 18 %

Аналогичные исследования проводились и для параметра консистенции m .

Приведенные данные позволяют сравнить влияние температуры и начальной влажности смеси на коэффициенты уравнения Оствальда-де-Вилля, которому соответствует среда, проходящая через предматричную зону экструдера. Анализ построенных графиков говорит о том, что температурный режим экструдирования менее важен для процесса, чем влажность первоначально загружаемой смеси. К аналогичным выводам пришли автор работы [9]. Разный

характер изменения этих характеристик (убывающий для параметра m и возрастающий для n) свидетельствует о пластифицирующем действии выделяемой жидкости при экструзии крахмала, которая снижает степень разрушения зерен при интенсивном сдвиге [10].

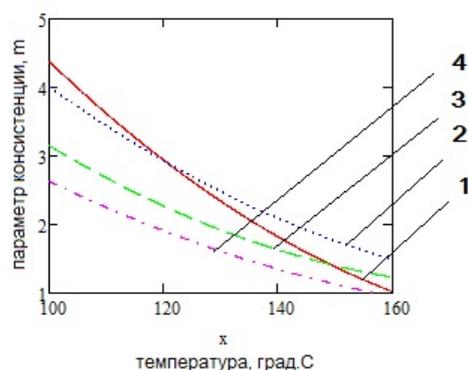


Рисунок 5 – Изменение параметра консистенции в предматричной зоне при первоначальной влажности смеси: линия 1 – 12 %; линия 2 – 14 %; линия 3 – 16 % и линия 4 – 18 %

Figure 5 – Change in the consistency parameter in the pre-matrix zone at the initial humidity of the mixture: line 1 – 12 %; line 2 – 14 %; line 3 – 16 % and line 4 – 18 %

ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили описать уточняющую модель для случая интенсификации осевого перемещения экструдруемой смеси и получить ее решение для течения несжимаемой неньютоновской жидкости, вязкостью которой предполагается подчиненной закону Оствальда-де-Вилля. Эти решения необходимы для оптимизации процессов, проходящих в предматричной зоне предложенного экструдера, обеспечивающего дополнительную составляющую осевой скорости ее перемещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Choudhary, O.P. Scanning Electron Microscope: Advantages and Disadvantages in Imaging Components / O.P. Choudhary, Priyanka Choudhary // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 6, No. 5. P. 1877–1882.
2. Reimer, L. Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis / Ludwig Reimer (Author), P.W. Hawkes (Editor). – Publisher: Springer (December 1, 2010). – 543 pp.
3. Способ производства модифицированного крахмала. Кузина Л.Б., Литвяк В.В., Лукин Н.Д., Кузьмина Л.Г., Никитина М.Ф., Копыльцов А.А. Патент на изобретение RU 2780025 C2, 19.09.2022.
4. Аксенова О.И. Разработка аппарата и определение рациональных режимов процесса для экструзионной переработки вторичного сырья

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ КУКУРУЗНЫХ КРАХМАЛОВ

пищевого назначения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ИТМО, СПб, 2020, 356 с.

5. Основы защиты интеллектуальной собственности. Алексеев Г.В., Боровков М.И., Дмитриченко М.И., Тартышный А.А. Учебное пособие / СПб, 2012, 156 с.

6. Василенко, В. Н. Аналитическое определение температурных полей биополимеров в формирующем канале экструдера при коэкструзии [Текст] / В. Н. Василенко [и др.] // Вестник ВГУИТ. - 2014. - № 1. - С. 13-18.

7. Сидоренко, А. С. Математическая модель неизотермического течения высоковязких сред в каналах матрицы экструдера [Текст] / А. С. Сидоренко, А. И. Потапов // Вестник ВГУИТ. - 2015. - № 4. - С. 48-52.

8. Изучение режимов кавитационного разрушения пищевого сырья как элемента нанотехнологий. Арет В.А., Алексеев Г.В., Верболоз Е.И., Кондратов А.В. Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. 2007. № 3. С. 29-31..

9. Шахов, С. В. Теоретическое описание закона распределения давления пищевого материала по длине винтового канала шнека в зависимости от сил трения в условиях стесненного сжатия [Текст] / С. В. Шахов [и др.] // ФЭС: Финансы. Экономика. - 2018. - Т. 15, № 9. - С.61-69.

10. Шевцов, А. А. Математическое моделирование течения расплава зерновой смеси через кольцевой канал матрицы экструдера [Текст] / А. А. Шевцов [и др.] // Известия ВУЗов. Пищевая технология. - 2008. - № 5-6. - С. 105-108.

Информация об авторах

Г. В. Алексеев - доктор технических наук, профессор Университета ИТМО.

А. П. Савельев - кандидат технических наук, докторант Университета ИТМО.

А. А. Бирченко – соискатель Университета ИТМО.

Е. Н. Ивлева - аспирант ОЦ «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО.

REFERENCES

1. Choudhary, O.P. (2017). Scanning Electron Microscope: Advantages and Disadvantages in Imaging Components. International Journal of Current Microbiolo-

gy and Applied Sciences. 6(5). 1877–1882.

2. Reimer, L. (2010). (Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis. Publisher: Springer (December 1, 2010). 543 pp.

3. Kuzina L.B., Litvyak V.V., Lukin N.D., Kuzmina L.G., Nikitina M.F. & Kopyltsov A.A. (2022). The method of production of modified starch. Patent for invention RU 2780025 C2, 09/19/2022. (in Russ.).

4. Aksenova, O.I. (2020). Development of apparatus and determination of rational process modes for extrusion processing of secondary raw materials for food purposes. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. ITMO, St. Petersburg, 356 p. (in Russ.).

5. Alekseev, G.V., Borovkov, M.I., Dmitrichenko, M.I. & Tartyshny, A.A. (2012). Textbook Fundamentals of intellectual property protection. St. Petersburg, 156 p. (in Russ.).

6. Vasilenko, V. N. [et al.] (2014). Analytical determination of temperature fields of biopolymers in the forming channel of an extruder during co-extrusion. Vestnik VGUIT. (1). 13-18. (in Russ.).

7. Sidorenko, A. S. & Potapov, A. I. (2015). Mathematical model of non-isothermal flow of high-viscosity media in channels extruder matrices. Vestnik VGUIT. (4). 48-52. (in Russ.).

8. Aret V.A., Alekseev G.V., Verboloz E.I. & Kondratov A.V. (2007). Study of the modes of cavitation destruction of food raw materials as an element of nanotechnology. Proceedings of the St. Petersburg State University of Low-temperature and Food Technologies. (3). 29-31. (in Russ.).

9. Shakhov, S. V.[et al.] (2018). Theoretical description of the law of pressure distribution of food material along the length of the screw channel of the screw depending on the friction forces in conditions of constrained compression. FES: Finance. Economy. 15(9). 61-69. (in Russ.).

10. Shevtsov, A. A. [et al.] (2008). Mathematical modeling of the flow of a grain mixture melt through the annular channel of the extruder matrix. Izvestiya VUZov. Food technology. (5-6). 105-108. (in Russ.).

Information about the Authors

G. V. Alekseev - Doctor of Technical Sciences, Professor ITMO University.

A. P. Savelyev - candidate of technical sciences, doctoral student ITMO University.

A. A. Birchenko - competitor ITMO University.

E. N. Ivleva - graduate student Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems" ITMO University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2024; одобрена после рецензирования 20 сентября 2024; принята к публикации 04 октября 2024.

The article was received by the editorial board on 14 Feb 2024; approved after editing on 20 Sep 2024; accepted for publication on 04 Oct 2024.