



УДК[658.5.012.1]

Особенности процесса экструдирования биополимеров как объекта управления и задачи управления процессом.

Хобин В.А., Егоров В.Б.

Одесская национальная академия пищевых технологий

Аннотация: На этапе разработки системы автоматического управления процессом экструдирования биополимеров перечисленные в статье особенности объекта управления выступают в форме проблем, степень преодоления которых, в конечном итоге, и определит уровень эффективности системы автоматического управления. При этом очевидно, что конструктивный подход к разработке эффективной системы автоматического управления должен быть адекватен проблемам, и, прежде всего, должен быть системным, в нашем случае системно-функциональным. В рамках такого подхода, методологическую основу составляют понятия «функциональная организация системы» и «развитие системы в направлении повышения функциональной целостности». Он и стал основой разработки концепции построения эффективных систем автоматического управления процессом экструдирования биополимеров.

Ключевые слова: технологический процесс, система автоматического управления, экструдирование, биополимеры.

Как уже отмечалось в предыдущих публикациях, процессы экструдирования широко распространены в различных отраслях промышленности, и сфера их применения расширяется. Этому способствует уникальное сочетание различных факторов воздействия на перерабатываемый продукт: пластическая деформация, высокая температура, высокое давление и его резкий сброс до атмосферного. При этом качество готовой продукции, энергетическая эффективность процесса в самой существенной степени будет зависеть от выбранных режимов экструдирования, точности, с которой удастся соблюдать эти режимы в производственных условиях, возможности предотвратить нарушения режимными (регламентированными) переменными установленными регламентом ограничений. ЭБП применяется как эффективный метод сохранения полезных составляющих исходного продукта и улучшения питательных характеристик конечного продукта. При ЭБП температура достигает 120...200 °С, а давление – 3...5 МПа. За счет этого происходят глубокие изменения в биохимическом составе питательных веществ сырья – крахмал частично расщепляется до декстринов и сахаров, протеины подвергаются денатурации, что приводит к повышению их питательной и кормовой ценности. Кроме того, после экструдирования существенно улучшаются механические и вкусовые качества пищевых продуктов и кормов, проходит инактивация ингибиторов ферментов, нейтрализация некоторых токсинов и уничтожение их продуцентов. Перечисленное обуславливает расширение применения экструзионных технологий для производства продуктов питания и кормления, которое поддерживается, в том числе, и широкими научными исследованиями [1-15, 16].

Практика показывает, что высокое качество изделий, получаемых экструзионными технологиями из химического полимерного сырья (пластиковые трубы, пленки, декоративные профили, изоляция токопроводящих жил и кабелей и т.д.) обеспечивается за счет достаточно простых САУ, реализующих только функции регулирования, т.е. стабилизации режимных переменных процесса на их заданных значениях. Эти функции регулирования реализуются на основе простейших типовых алгоритмов, как правило, ПИД-алгоритмов регулирования (регуляторов), см., например, [17, 18]. Такое возможно только благодаря тому, что рецептура экструдированных смесей и характеристики исходного сырья не изменяются. Это обуславливает два важнейших для управления процессом обстоятельства. Во-первых – неизменность найденных на этапе специальных исследований оптимальных режимов экструдирования, т.е. неизменность заданных значений режимных переменных процесса на всем этапе производства одинаковой продукции. Следствие этого – отсутствие необходимости в ходе процесса реализовывать такие функции управления как оптимизацию, гарантирование, адаптацию. Во-вторых – отсутствие возмущений по сырью, т.е. отсутствие влияния характеристик сырья на изменения текущих значений режимных переменных процесса, последствия которых и необходимо компенсировать САУ при реализации функции регулирования. Возмущения, которые сохраняются, связаны с колебаниями напряжения и частоты питающей электросети, температуры охлаждающей зоны прессования воды, износом рабочих органов экструдера. Интенсивности этих возмущений являются очень низкими, поэтому задача стабилизации режимов процесса является достаточно простой.

При экструдировании продуктов растительного и животного происхождения (биополимеров), в частности комбикормовых смесей, ситуация с сырьем для экструдирования совершенно другая. Она характеризуется следующими факторами:

– рецептура экструдированных продуктов, и, следовательно, состав их сырья, достаточно динамично изменяются

**АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

из-за предъявления к продуктам все более высоких требований, в частности – повышения их питательной ценности, снижения себестоимости производства, расширения сырьевой базы, обогащения минералами и витаминами;

– характеристики исходного продукта, даже в рамках одной рецептуры, всегда отличаются друг от друга (из-за особенностей почвы на месте произрастания, применяемых удобрений, выпавших осадков, условий хранения и т.д.) и, следовательно, в ходе процесса они могут существенно изменяться.

Таким образом, ТП ЭБП как ОУ, по сравнению с ТП экструдирования химического полимерного сырья, имеет принципиальные особенности, которые должны найти отражение в задачах управления, и которые должны быть учтены на этапе разработки САУ, претендующей на эффективность. Обоснуем эти задачи.

1. Найденные в лабораторных условиях регламенты ведения ТП ЭБП, т.е. набор заданных значений режимных переменных, для производственных условий должны рассматриваться не как оптимальные, а только как квазиоптимальные (достаточно близкие к оптимальным). Такая неопределенность, а она может быть существенной, вызвана неизбежными различиями в характеристиках сырья, конструкции и состоянии рабочих органов экструдеров, которые использовались в лабораторных условиях, и которые будут использоваться на предприятиях в условиях промышленного производства. Эта неопределенность может быть раскрыта только непосредственно в ходе конкретного ТП. Для этого потребуются измерение, желательное в реальном времени или с минимальным запаздыванием, некоторых доступных для такого измерения показателей экструдата, прямо или косвенно характеризующих качественные результаты процесса экструдирования. Информация, полученная в ходе этих измерений, даст объективные основания для изменения (коррекции) заданных значений регламентированных переменных регуляторам САУ, стабилизирующим процесс. Таким образом, эффективная САУ должна решать задачу оптимизации текущего режима ведения ТП ЭБП для конкретного сырья непосредственно в ходе его переработки [19]. При этом рекомендованные значения режимных переменных, полученные по результатам лабораторных исследований, должны рассматриваться как квазиоптимальные и использоваться при поисковой оптимизации как начальные приближения.

2. Количество переменных (показателей), характеризующих качество продукта экструдирования в реальном времени, достаточно велико и имеет тенденцию к увеличению. Большинство из них имеют ограничения на диапазоны своего изменения, отражающие предельно допустимые изменения в характеристиках сырья, нарушение которых резко снижает качество продукта экструдирования и/или нарушает допустимые режимы эксплуатации экструдеров. При этом количество управляющих воздействий, целенаправленным изменением которых можно было бы поддерживать эти показатели в качестве регламентированных переменных в окрестностях заданных их значений, очень ограничено. В этом случае необходимо решать задачу автоматического выявления такой регламентированной переменной процесса экструдирования, значение которой в текущем режиме работы является критическим, т.е. вероятность нарушения заданных этой переменной ограничений превышает допустимую. Выявив критическую переменную, можно сформировать такие управляющие воздействия, которые гарантировали бы нахождение ее значения в поле допусков [20].

3. Возмущения, вызванные изменением характеристик сырья в ходе ТП ЭБП, могут вызывать существенные отклонения режимных переменных от их заданных значений. Последствия возмущений, как уже отмечалось, должны быть компенсированы изменением управляющих воздействий регуляторов САУ. Учитывая также, что регуляторам необходимо выводить режимные переменные на квазиоптимальные заданные значения (при выводе экструдера с холостого хода на рабочую нагрузку) и переводить их на новые заданные значения (в ходе процедуры поиска оптимального режима экструдирования), то суммарные ошибки регулирования могут быть значительными. Стремление к минимизации потерь эффективности ТП, вызванных этими ошибками, делает актуальной задачу повышения динамической точности процессов регулирования, а она, в свою очередь, неизбежно поставит задачу обеспечения грубости (робастности) системы регулирования. Последнее обусловлено тем, что изменение характеристик сырья изменяет не только значения режимных переменных, но и свойства ОУ по каналам регулирования. Следует также учесть, что обеспечение грубости системы за счет реализации адаптивных алгоритмов вряд ли будет эффективно, так как в условиях достаточно интенсивных возмущений эти алгоритмы, как правило, плохо сходятся и сами создают значительную составляющую движения системы, а, следовательно, и дополнительные составляющие ошибок регулирования. В этом случае более целесообразно использовать алгоритмы регулирования, разработанные, см. [90], специально для объектов технологического типа, которые обеспечивают расширенные запасы устойчивости систем по сравнению с типовыми алгоритмами.

4. Один из важнейших каналов управления, канал «подача продукта – нагрузка на валу приводного электродвигателя», при определенных, но, в силу значительных возмущений по сырью, при априори неизвестных значениях подачи сырья на экструдирование и сочетания других условий ведения ТП, изменяет свои свойства со статических на астатические. Это резко усложняет управление процессом, провоцируя заклинивание шнека экструдера продуктом и аварийную остановку его ПЭД и всего ТП, с самыми негативными для его эффективности последствиями. Кроме того, такие аварийные остановки требуют большого объема малоквалифицированного

**АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

ручного труда по разборке экструдера и очистке его рабочих органов от спекшегося сырья для нового включения в работу, провоцируют поломки оборудования, снижают его общий ресурс. Ситуация осложняется тем, что наиболее эффективные (по крайней мере, в энергетическом аспекте) режимы работы экструдера обеспечиваются при подаче сырья, близкой к режиму заклинивания. При этом задача повысить энергетическую эффективность ЭБП входит в противоречие с задачей предотвратить возникновение аварийных ситуаций. Разрешить это противоречие, обеспечив поддержание в реальном времени заранее заданного компромисса между вероятностью возникновения аварийной ситуации и предельно достижимой для этой вероятности экономической эффективности возможно за счет решения задачи гарантирующего управления [21].

Обоснованный выше перечень задач управления ТП ЭБП возможно не является исчерпывающим. Новые задачи могут стать актуальными после реализации САУ всех или некоторых исходных задач. Следует также отметить, что последовательность формулирования задач не отражает их приоритета перед остальными. Задачи взаимосвязаны, и максимального эффекта можно достичь только при их полной реализации. Вместе с тем процедура реализации задач управления является последовательной. Поэтому первоначально необходимо решать задачи регулирования, повышая динамическую точность стабилизации регламентированных переменных и, в частности, задачу 4. Подчеркнем, что задачи управления, которые ставятся разработчиком, в самой САУ реализуются в форме функций, совокупность которых определяют функциональную организацию САУ, отражаемую ее функциональной структурой [22].

Существующие, в т.ч. штатные, САУ процессом ЭБП, [23, 24, 25-28], реализуют на практике, как правило, только функцию регулирования (стабилизации) тока нагрузки ПЭД экструдера и температурного режима прессования сырья. Практика эксплуатации САУ показывает, что они не могут обеспечить устойчивое функционирование экструдера в энергетически эффективных режимах и, одновременно, высокие показатели качества готового продукта. Главные причины этого – динамично изменяющиеся характеристики компонентов сырья, их состав в рецептуре производимых продуктов, износ рабочих органов, колебания напряжения питающей сети, наличие ограничений, накладываемых регламентом ведения процесса ЭБП на диапазоны изменения его параметров. Это обуславливает актуальность задачи совершенствования САУ ЭБП. В основу такого совершенствования должны быть положены современные достижения в ТАУ, информационных технологиях и программно-техническом обеспечении систем автоматизации. Их применение должно позволить повысить качество реализации «старой» функции – функции регулирования и реализовать новые – функцию измерения в реальном времени некоторых параметров готового продукта на выходе из экструзионной головки, функцию гарантирования и функцию оптимизации режима ЭБП.

Повышение качества реализации функции регулирования должно идти в направлении существенного повышения динамической точности стабилизации тока нагрузки ПЭД и запаса устойчивости его контура регулирования. Это позволит вести ЭБП в режиме, близком к режиму максимально допустимой нагрузки на ПЭД и, следовательно, производительности, когда удельные энергозатраты (при прочих равных условиях) минимальны. Измерение в реальном времени на выходе из экструзионной головки таких параметров готового продукта как его диаметр, цвет, неоднородность поверхности, даст, пусть и косвенную, но объективную и оперативную информацию об его качестве [19]. Это может позволить на основе этой информации так целенаправленно использовать ресурсы управления ЭБП, чтобы продукт максимально соответствовал требуемому качеству. Функция гарантирования [20, 21] должна обеспечить:

а) оценивание в реальном времени и на его скользящих интервалах текущих значений вероятностей нарушений установленных регламентом ограничений (полей допусков), включая и перечисленные выше параметры, характеризующие качество;

б) коррекцию текущих режимов ЭБП, при которой значения этих вероятностей не превышали бы их заданных предельно-допустимых, наперед заданных, значений. Это позволит гарантировать соблюдение требований к качеству продукции и безаварийную отказоустойчивую работу пресса экструдера, в том числе, и это главное – в окрестности предельно-допустимых нагрузок ПЭД. Именно это создаст необходимые условия для минимизации удельных энергозатрат на ТП. Функция оптимизации текущего режима ЭБП должна позволить целенаправленно перераспределять ресурсы управления процессом для достижения максимального экономического эффекта при безусловном выполнении всех технологических и эксплуатационных требований.

Следует подчеркнуть, что действие всех перечисленных функций, которые должны реализовать САУ процессом ЭБП, самым существенным образом взаимосвязано. При этом эффективность функционирования каждой из них во многом влияет на эффективность других и наоборот. Поэтому разработка эффективной САУ процессом ЭБП представляет собой целостную и достаточно наукоемкую задачу. Исходным этапом такой разработки должно стать построение наиболее общей (концептуальной) модели пресса экструдера как ОУ. Такая модель, по-сути, будет являться первым этапом конкретизации и формализации тех новых задач управления ЭБП, которые были сформулированы выше. Она составит основу для разработки САУ с целевым набором функций, которые позволят решать сформулированные задачи управления и достигнуть главной цели разработки такой САУ – повышения качества экструдата и энергетической эффективности ТП ЭБП.

Проведенный выше краткий анализ особенностей процесса ЭБП предопределил состав системообразующих



**АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

функций, см. [21, 22], перспективной САУ этого процесса. Анализ изменений наиболее важных свойств экструдера при изменениях свойств растительного сырья, которые самым существенным образом влияют на показатели качества готового продукта, энергетическую эффективность и устойчивость ТП, был проведен в [23]. Дополнив их анализом воздействий, доступных для целенаправленного изменения, т.е. выявив состав потенциальных управляющих воздействий, за счет изменения которых можно влиять целенаправленно на ход процесса ЭБП, реализуя необходимые функции управления, можно представить концептуальную модель процесса ЭБП в виде структурной схемы, см. рис. 1. Стрелки, которыми на схеме обозначены переменные, указывают направление их взаимодействия – «от причины к следствию», а прямоугольники отображают наличие неединичных операторов преобразования этих переменных.

На структурной схеме выделены следующие группы переменных:

- переменные, являющиеся косвенными показателями качества экструдруемого продукта и доступные для измерения в реальном времени (например, с использованием интеллектуального канала видеoinформации [19, 24]): $D_э$, $C_э$, $\alpha_э$ – соответственно диаметр, цветность и степень неоднородности поверхности продукта на выходе из экструзионной головки;

- переменные, характеризующие тепловой режим обработки растительного сырья: θ_1 , θ_2 , θ_3 , $\theta_г$ – температуры внутреннего цилиндра экструдера по трем зонам и его экструзионной головки;

- переменные, характеризующие производительность экструдера: объемная в разных зонах: Q_{o1} , Q_{o2} , Q_{o3} , объемная и массовая после экструзионной головки $Q_{ог}$ и $Q_м$ (переменные $Q_{o1} \dots Q_{ог}$ недоступны для прямого измерения);

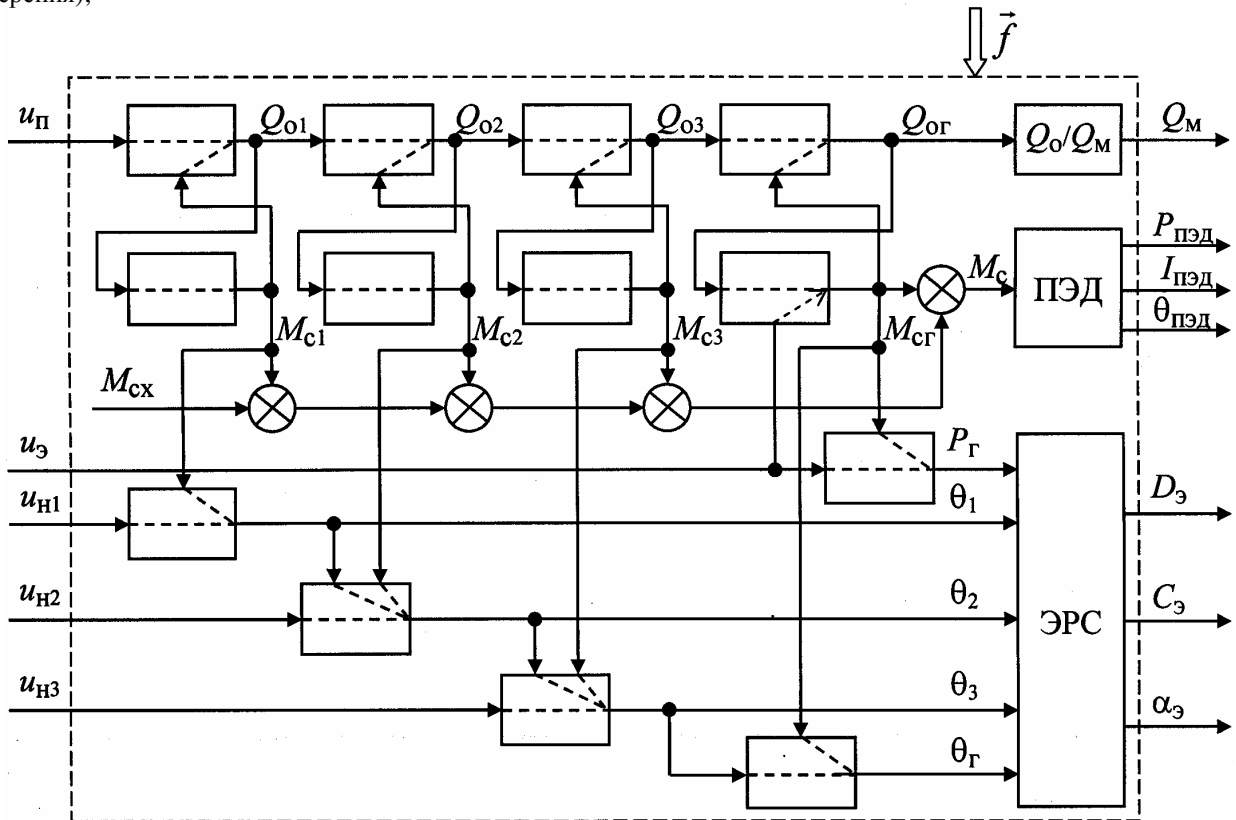


Рис. 1. Структурная схема концептуальной модели процесса
экструдирования растительного сырья как ОУ

- переменные, характеризующие силы (моменты) сопротивления, возникающие при экструдировании на валу ПЭД: M_{c1} , M_{c2} , M_{c3} , $M_{cг}$ сопротивления по зонам прессующего шнека и в головке (все эти переменные недоступны для прямого измерения); M_{cx} – момент сопротивления на холостом ходу экструдера; $P_г$ – давление экструдруемого продукта в головке; $P_{пэд}$, $I_{пэд}$ – электрическая мощность и ток нагрузки, потребляемые ПЭД шнека; $\theta_{пэд}$ – температура обмоток ПЭД;

- возмущающие воздействия (в общем случае – неизмеряемые, т.е. информация о которых недоступна для

**АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

измерения, или ее по другим причинам невозможно использовать в алгоритме управления): \vec{f} – вектор, отражающий влияние изменения биохимических и физических характеристик экструдруемого сырья, характеристик рабочих органов, сети электропитания и других факторов, на указанные выше переменные и на свойства операторов, отражающих их взаимодействия;

– управляющие воздействия, т.е. переменные, доступные для целенаправленного изменения хода процесса ЭБП, в частности для компенсации последствий возмущающих воздействий: u_n – сигнал на изменение питателем подачи сырья из накопительного бункера в шнек экструдера (например, управляющее напряжение, подводимое к преобразователю мощности, через который питается вибропитатель экструдера); u_s – сигнал на исполнительный механизм изменения рабочего сечения канала движения материала в экструзионной головке; u_{n1} , u_{n2} , u_{n3} – сигналы (управляющие напряжения), подводимые к преобразователям мощности, через которые питаются обогреватели (ТЭНы) зон шнека экструдера.

Важно отметить следующее. Наличие в модели недоступных для измерения переменных \vec{f} , $Q_{o1} \dots Q_{oq}$, M_{c1} , M_{c2} , M_{c3} , M_{cr} отражает существенную неопределенность ее свойств относительно объекта-оригинала. Эту неопределенность необходимо стремиться отразить в ММ ОУ, и, поскольку она является важнейшим фактором, который в значительной мере ограничивает потенциальные возможности САУ по эффективному ведению процесса ЭБП, учитывать ее на этапе разработки этой САУ.

Структурная схема не исчерпывает содержание концептуальной модели, его необходимо дополнить описанием влияния входных воздействий на выделенные в структурной схеме внутренние и выходные переменные ОУ. Характер этого влияния, т.е. характер взаимосвязей входных и выходных переменных каналов, будет определяться физической сущностью их свойств. Сделаем это последовательно, рассматривая изменения переменных, которые первоначально вызываются изменениями управляющих воздействий, и учитывая при этом влияние возмущений.

Выводы: Разработанная концептуальная модель процесса ЭБП позволила выявить принципиально важные для ОУ особенности: а) высокий уровень неполноты информации о состоянии процесса и последствиях управляющих воздействий; б) существенное ограничение ресурсов на управление процессом; в) высокий уровень неопределенности свойств экструдера как ОУ. Структурная схема, как графическая форма концептуальной модели, отразила в удобной форме взаимосвязи входных, внутренних и выходных переменных ОУ. Ее анализ вскрыл физическую сущность свойств и характер этих взаимосвязей. Это составит важную основу дальнейшего развития модели, которое предполагает конкретизацию свойств каналов управления и их перекрестных каналов, прежде всего их динамических свойств.

Литература:

1. Horan F.E., Wolff H. Meat Analogs – Supplement // New protein Foods/Ed./ A.M. Altschus. – London: Academic Press, 1976. – v. 2. – pp. 260 – 279.
2. Horan F.E. Protein texturization // Food Proteins/Eds. J.R. Whitaker, S.R. Tannenbaum. – Westport, Connecticut: AVI Publishing Co., inc., 1977. – ch. 19. – pp. 484 – 515.
3. Van Zuilichem D.J., Stolp W. Survey of the present extrusion cooking techniques in the food and confectionary industry // Proc. Europ. Conf.: Extrusion Technology for the food Industry. – Dublin, Rep. Ireland: 9 – 10 Dec. 1986. – pp. 1 – 15.
4. Atkinson W.T. Meat – like protein food product // US patent N 3488770, 1970.
5. Smith O.V. Extrusion cooking // New protein Foods/Ed./ A.M. Altschus. – London: Academic Press, 1976. – v. 2. – pp. 86 – 121.
6. Lillford P.J. Texturization of proteins. – Food Structure – Its creation and Evaluation/Eds. J.M.V. Blanshard, J.R. Mitchel. – Butterworths: Elsevier Applied Science Publishers, 1988. – ch.8. – pp. 355 – 384.
7. Толстогузов В.Б. Новые формы белковой пищи. – М., Агропромиздат, 1987. – 304 с.
8. Guy R.G.E., Horne A.W. Extrusion and co-extrusion of cereals // Food Structure – Its creation and Evaluation/Eds. J.M.V. Blanshard, J.R. Mitchel. – Butterworths: Elsevier Applied Science Publishers, 1988. – ch. 8. – pp. 331 – 349.
9. Colonna P., Buleon A., Mercier C. Physically modified starches // Properties and Potential/Ed. Galliard T. – Chichester – New York – Brisbane – Toronto – Singapore: Jon Willey and sons. 1987. – v. 13. – ch. 4. – pp. 79 – 114.
10. Ковбаса В.М. Наукове обґрунтування високотемпературної екструзії природних біополімерів та розроблення раціональних технологій харчоконцентратів і хлібопродуктів підвищеної якості: Автореферат дисертації д.т.н. – Київ, 1998. – 41 с.
11. Черно Н.К., Озолина С.А., Кундиловская Т.А. Экструдирование зерновых продуктов, обогащенных пищевыми волокнами // Тез. докл. IV Международ. конф. «Экология. Продукты питания. Здоровья». – Одесса, 1995. – С. 27.
12. Clayton G. Rendering by extrusion // Feed International. – 2001. – V 22. – N 2. – P24 – 26.
13. Feed manufacturing Technology IV / R.R. McEllhiney. – Arlington. V.A.: American Feed Industry Association, Inc., 1994. – 606 p.

**АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

14. Yuryev V.P., Likhodzievskaya I.B., Grinberg V. Investigation of the microstructure of textured proteins produced by thermoplastic extrusion // *Nahrung*, v. 33. – N 9. – pp. 823 – 830, 1989.
15. Yuryev V.P., Zasyplin D.V. Structure of protein texturates obtained by thermoplastic extrusion // *Nahrung*, v. 34. – N 7. – pp. 607 – 613, 1990.
16. Экструзия в пищевой технологии / А.Н. Остриков, О.В. Абрамов, А.С. Рудометкин. – СПб.: ГИОРД, 2004. – 288 с.: ил.
17. Коврыгин Л.А., Труханова Н.М. Автоматизированное управление процессом экструзии полимеров. – Екатеринбург, 2002. – 99 с.
18. Володин В.П. Экструзия профильных изделий из термопластов. – СПб.: Профессия, 2005. – 480 с.
19. Хобин В.А., Егоров В.Б. Повышение эффективности процесса экструдирования комбикормов средствами автоматического управления // *Зерновые продукты и комбикорма*. – Одесса, 2008. – № 3 (31). – С. 53 – 54.
20. Хобин В.А. Функция гарантирования в системах автоматического управления // *Автоматизация виробничих процесів*. – Київ, 2002. № 1(14). – С. 145 – 150.
21. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения / Монография: Одесса: «ТЭС», 2008. – 304 с.
22. Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
23. Хобин В.А., Егоров В.Б. Процесс экструдирования растительного сырья как объект управления: особенности, задачи управления, структура // *Мат. XV міжнарод. конф. з автоматичного управління (Автоматика – 2008)*. – Одеса: ОНМА, 2008. – Мат. в 2-х т. – Т. 2. – С. 643 – 646.
24. Хобин В.А., Егоров В.Б. Интеллектуальный канал видеoinформации для систем управления процессом экструдирования растительного сырья // *XVI Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика-2009»*. Тез. доп. – Чернівці: Книги – XXI, 2009. – С. 225 – 226.
25. Howard P. Isermann. Twin-Screw Food Extrusion: Control Case Study // Joel Schlosburg. – May 12th, 2005. – <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/WWW/faculty/bequette/URP/JoelS-presentation.pdf>.
26. Popescu O., Popescu D.C., Wilder J., KARWE M.V. A new approach to modeling and control of a food extrusion process using artificial neural network and an expert system // *Journal of Food Process Engineering*, 2001. – 24. – P. 17 – 36.
27. Oonsivilai A., Oonsivilai R. Genetic Algorithms Approach to Twin-Screw Food Extrusion Process Frequency Domain Parameter Estimation // *7th WSEAS Int. Conf. on Applied Computer & Applied Computational Science (ACACOS '08)*, Hangzhou, China. – April 6 – 8, 2008. – С. 645 – 650.
28. Fodil-Pacha F., Arhaliass A., Ait-Ahmed N., Boillereaux L., Legrand J. Fuzzy control of the start-up phase of the food extrusion process // <http://www.sciencedirect.com /science? ob=ArticleURL& udi=B6T6S-4M0J4FR-1& user=10& rdoc=1& fmt=& orig=search& sort =d& docanchor=& view=c& searchStrId=1061119041& rerunOrigin=google& acct=C000050221& version=1& urlVersion=0& userid=10& md5=c445afb230c119d1999e93dba2665b79>.