

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ПИЩЕВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ: СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

С.И. Дворецкий, В.Н. Долгунин, О.В. Зюзина, Е.И. Муратова

*Кафедра «Технологическое оборудование и пищевые технологии»,
ГОУ ВПО «ТГТУ»*

Ключевые слова и фразы: аппаратурно-технологическое оформление; быстрые гравитационные течения; интегрированное проектирование; переработка зернистых материалов; пищевая технология; сегрегация; система автоматического управления; функциональные продукты питания.

Аннотация: Представлены основные научные направления кафедры «Технологическое оборудование и пищевые технологии» ГОУ ВПО «ТГТУ». Разработаны методы и комплекс быстродействующих алгоритмов решения задач моделирования и оптимизации при интегрированном проектировании гибких автоматизированных производств в условиях неопределенности физической, химической, технологической и экономической информации. Созданы методология и программное обеспечение интегрированного проектирования технологических процессов и систем управления как единого автоматизированного комплекса, разработаны алгоритмы и программы имитационного моделирования этих комплексов «технологический объект – система автоматического управления». Разработана теоретическая база, позволяющая определять величину потоков сегрегации и миграции при сдвиговой деформации и быстром сдвиговом течении несвязных сферических частиц. При этом для прогнозирования динамики полей концентрации неоднородных частиц условно бинарной смеси необходимо располагать информацией о традиционных физико-механических характеристиках частиц и сыпучих материалов и определить единственную экспериментальную кинетическую характеристику (коэффициент сегрегации) для данной пары компонентов смеси. Величина потоков сегрегации и миграции определяется в зависимости от размера частиц, структурных и кинематических параметров потока (скорости сдвига и порозности). Разработаны технологии комбинированных молочных продуктов и кондитерских изделий функционального назначения с улучшенными органолептическими, физико-химическими и микробиологическими показателями и увеличенным сроком хранения, ориентированные на сохранение здоровья здорового человека.

Теоретические основы создания энерго- и ресурсосберегающих процессов и оборудования гибких автоматизированных производств

Данное научное направление в ТГТУ развивается под руководством д-ра техн. наук, профессора С.И. Дворецкого с 1980 г. и посвящено разработке стратегии, методов и быстродействующих алгоритмов интегрированного проектирования энерго- и ресурсосберегающих технологических процессов, аппаратов и систем автоматического управления, обеспечивающих устойчивое и безопасное производство качественной конкурентоспособной продукции. Проблема совместного проектирования технологических систем и систем управления режимами их

функционирования ставилась и частично решалась на протяжении многих десятилетий, начиная с Д. Уатта. Однако до настоящего времени нет законченной научной концепции и достаточно простого математического аппарата для комплексного решения этой сложной многокритериальной проблемы. Теория и методы имитационного исследования оценки эффективности функционирования автоматизированных технологических систем, выбор экономически целесообразных аппаратов и систем управления более 40 лет развиваются научными школами академика В.В. Кафарова, профессоров Б.Н. Девятова, И.В. Анисимова, В.И. Бодрова и др. Идеи и научные разработки этих школ находят свое продолжение и развитие в научном направлении ведущей научной школы профессора С.И. Дворецкого. По данному научному направлению защищены 2 докторские и 15 кандидатских диссертаций, в ведущих научных отечественных и зарубежных изданиях опубликованы 2 монографии, 2 учебника, более 150 научных статей и получено более 20 патентов на изобретения.

Устойчивое выполнение регламентных требований при эксплуатации производства осложняется наличием неопределенности в исходных данных для проектирования и случайными изменениями технологических переменных в ходе самого производства. Целью интегрированного проектирования является создание работоспособных (гибких) производств, способных к управлению и сохранению своего функционального назначения при случайном изменении внутренних и внешних неопределенных параметров. На этапе эксплуатации гибкого производства условия его функционирования, задаваемые технологическим регламентом, должны выполняться независимо от случайного изменения неопределенных параметров в заданной области за счет соответствующего выбора управляющих воздействий, реализуемых в системе автоматического управления. Таким образом, при интегрированном проектировании оптимальные конструктивные параметры аппаратного оформления технологических процессов, режимы их функционирования, класс и настроечные параметры систем автоматического управления должны выбираться из условия разумного компромисса между эффективностью работы производства с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, качества выпускаемой продукции и качества управления режимами его функционирования [1–12].

В общем виде задачу интегрированного проектирования можно сформулировать следующим образом. Пусть нам известна некоторая информация о векторе неопределенных параметров (возмущающих воздействий) ξ , принимающих любые значения из заданной области Ξ , которую обычно считают прямоугольной, $\Xi = \{\xi \mid \xi^L \leq \xi \leq \xi^U\}$. Наиболее распространен случай, когда вектор ξ состоит из двух подвекторов $\xi^{(1)} \in \Xi^{(1)}$ и $\xi^{(2)} \in \Xi^{(2)}$, в подвектор $\xi^{(1)}$ входят параметры, которые могут быть идентифицированы на этапе эксплуатации производства, а в подвектор $\xi^{(2)}$ – параметры, которые являются неопределенными как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации производства. Кроме того, практически важное значение имеет задача с двумя группами ограничений (жесткими и мягкими). В первую группу (с индексами $j \in J_1 = (1, \dots, m_1)$) входят жесткие ограничения, во вторую группу (с индексами $j \in J_2 = (m_1 + 1, \dots, m)$) – мягкие ограничения, которые должны выполняться с заданной вероятностью ρ_{giv} . Введем целевую функцию f , вектор-функцию условий осуществления технологических процессов производства (ограничений) $g = (g_1, \dots, g_m)$, и пусть есть множество Ω значений ξ , при которых могут быть выполнены ограничения задачи, причем

$\Pr_{\xi} \{\xi \in \Omega\} \geq \rho_{\text{giv}}$. Тогда задача интегрированного проектирования энерго- и ресурсосберегающих процессов и систем автоматического управления заключается в определении варианта $a \in A$ аппаратного оформления, векторов конструктивных параметров $d(a) \in D$ и режимных (управляющих) переменных $z \in Z$ (или оптимальных заданий y_{giv} регуляторам систем автоматического регулирования), класса $b \in B$, структуры $h_b(s) \in H$ и вектора настроечных параметров $s \in S$ систем автоматического управления, при которых независимо от изменения $\xi \in \Xi$ усредненный критерий $f(a, d, z, b, h(s), \xi^{(1)}, \xi^{(2)})$, учитывающий как показатели энерго- и ресурсосбережения, так и качество управления, достигает оптимального значения, а другие требования технического задания на проектирование производства и системы управления, например, по качеству выпускаемой продукции, экологической безопасности и другим технико-экономическим показателям, выполняются безусловно (жестко) и (или) с заданной (но достаточно высокой) вероятностью ρ_{giv} .

Тогда задача интегрированного проектирования энерго- и ресурсосберегающих ХТП и САУ заключается в определении таких $a^* \in A$, $d^* \in D$, $z^* \in Z$, $b^* \in B$, $h^*(s)$ и $s^* \in S$, что

$$\min_{a,d,b,h(s)} I(a,d,b,h(s)) = \min_{a,d,b,h(s)} \{I_1(a,d,b,h(s)) + I_2(a,d,b,h(s))\}, \quad (1)$$

где

$$I_1(a,d,b,h(s)) = \int_{\Omega} \left(\min_z \left(M_{\xi^{(2)}} \{f(a,d,z,b,h(s), \xi^{(1)}, \xi^{(2)})\} \right) \right. \\ \left. \left| \max_{\xi^{(2)}} g_j(a,d,z,b,h(s), \xi^{(1)}, \xi^{(2)}) \leq 0, j \in J \right. \right) P(\xi^{(1)}) d\xi^{(1)}, \quad (2)$$

$$I_2(a,d,b,h(s)) = \int_{\Xi \setminus \Omega} \left(\min_z \left(M_{\xi^{(2)}} \{\hat{f}(a,d,z,b,h(s), \xi^{(1)}, \xi^{(2)})\} \right) \right. \\ \left. \left| \max_{\xi^{(2)}} g_j(a,d,z,b,h(s), \xi^{(1)}, \xi^{(2)}) \leq 0, j \in J_1 \right. \right) P(\xi^{(1)}) d\xi^{(1)}, \quad (3)$$

$$\hat{f}(a,d,z,b,h(s), \xi^{(1)}, \xi^{(2)}) = f(a,d,z,b,h(s), \xi^{(1)}, \xi^{(2)}) + \\ + A \max_{j \in J^*} \left(\max_{\xi^{(2)}} g_j(a,d,z,b,h(s), \xi^{(1)}, \xi^{(2)}), 0 \right), \quad (4)$$

где A – штрафной коэффициент, $A > 0$; J^* – множество индексов ограничений, за нарушение которых берется штраф; $M_{\xi^{(2)}} \{\bullet\}$ – математическое ожидание $\{\bullet\}$ на множестве Ξ неопределенных параметров, $\Xi = \{\xi \mid \xi_k^L \leq \xi_k \leq \xi_k^U\}, k = \overline{1, m}$; $\Pr_{\xi} \{\bullet\}$,

ρ_{giv} – значения вероятностей выполнения технологических условий; $P(\bullet)$ – плотность распределения вероятности случайной переменной (\bullet);
при условиях

$$\Pr_{\xi} [g_j(a, d, z, b, h(s), \xi) \leq 0, j \in J_2] \geq \rho_{\text{giv}}$$

или

$$\Pr_{\xi} [\xi \in \Omega] \geq \rho_{\text{giv}},$$

$$\Omega(a, d, z, b, h(s)) = \left\{ \xi \left| \min_z \max_{\xi} \max_{j \in J} g_j(a, d, z, b, h(s), \xi) \leq 0 \right. \right\}, \quad (5)$$

$$F(a, d, b, h(s)) = \max_{\xi^{(1)} \in \Xi^1} \min_z \min_{\xi^{(2)} \in \Xi^2} \max_{j \in J_1} g_j(a, d, z, b, h(s), \xi^{(1)}, \xi^{(2)}) \leq 0. \quad (6)$$

Задача оптимизации (1) – (6) решается при связях в форме уравнений математических моделей ХТП непрерывного действия (уравнения статики ХТП и динамики функционирования САУ с типовыми регуляторами ПИ, ПИД).

Учениками ведущей научной школы под руководством профессора С.И. Дворецкого разработан комплекс быстродействующих алгоритмов решения задач моделирования и оптимизации при интегрированном проектировании гибких автоматизированных производств в условиях неопределенности физической, химической, технологической и экономической информации [8–12]. Проведены экспериментальные исследования кинетики процессов тонкого органического синтеза, и разработаны математические модели этих процессов. Созданы методология и программное обеспечение интегрированного проектирования технологических процессов и систем управления как единого автоматизированного комплекса, разработаны алгоритмы и программы имитационного моделирования этих комплексов «технологический объект – система автоматического управления» [5–7]. Разработаны непрерывные технологические процессы и новые образцы энерго- и ресурсосберегающих реакторных установок диазотирования, азосочетания, нитрования и др., высокопроизводительные малогабаритные реакторные установки трубчатого типа с диффузор-конфузорными устройствами турбулизации потока, сформулированы принципы энергосберегающего управления, разработаны алгоритмы и системы энергосберегающего управления для многоассортиментных производств органических полупродуктов и красителей. Практическая реализация наших разработок при создании гибкого автоматизированного производства азопигментов позволила расширить диапазон производительности реакторных установок от 100 до 5000 т/год; увеличить выход азокрасителей до 98...99 %, что на 2...3 % выше действующих анилинокрасочных производств; уменьшить энергозатраты в среднем на 10...15 %; снизить металлоемкость установок в среднем на 20 %; сократить сроки освоения новой продукции в 2–3 раза и снизить потребность в обслуживающем персонале на 30 % (за счет высокого уровня автоматизации производства) [1, 2, 10, 11].

Созданные прогрессивные и экологически безопасные технологии, оборудование и системы автоматического управления их режимами крайне необходимы и своевременны для перевооружения предприятий анилинокрасочной промышленности. Разработанные нами методы, алгоритмы и программное обеспечение математического моделирования, оптимизации и интегрированного проектирования в условиях неопределенности информации с высоким эффектом могут быть применены для создания прогрессивных энерго- и ресурсосберегающих процессов, аппаратов и автоматических систем управления для химической, пищевой и смежных с ними отраслей промышленности.

В настоящее время коллектив научной школы под руководством профессора С.И. Дворецкого работает в рамках Научно-образовательного центра «ТГТУ – ОАО «Корпорация «Росхимзащита» по одному из приоритетных научных направлений центра, связанного с разработкой методов, алгоритмов и программного обеспечения интегрированного проектирования гибкого производства наноструктурированных регенеративных продуктов нового поколения и созданием на их основе средств индивидуальной защиты с автономным снабжением пользователя кислородом.

В число основных решаемых задач входят:

- проведение экспериментальных исследований по изучению возможности совместного синтеза наноструктурированного регенеративного продукта на основе надпероксида калия с различными добавками (соединения Ca, Li, Si), кинетики процесса получения наноструктурированного регенеративного продукта на матрице, кинетики процесса хемосорбции диоксида углерода и определение оптимальной конфигурации наноструктурированного регенеративного продукта;
- разработка энерго- и ресурсосберегающего способа получения наноструктурированного регенеративного продукта на основе надпероксида калия с различными добавками (соединения Ca, Li, Si);
- математическое моделирование кинетики адсорбции диоксида углерода на регенеративном продукте и изменения содержания углерода во вдыхаемом воздухе изолирующего дыхательного аппарата при наличии неопределенностей;
- интегрированное проектирование изолирующих дыхательных аппаратов с увеличенным ресурсом действия по сравнению с серийно выпускаемыми (отечественными и зарубежными) в условиях неопределенности;
- разработка новых принципов и алгоритмов управления процессом регенерации воздуха в изолирующих дыхательных аппаратах в условиях неопределенности.

Технология и техника переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках

Данное научное направление в ТГТУ развивается под руководством д-ра техн. наук, профессора В.Н. Долгунина с 1985 г. Процессы с дисперсной твердой фазой широко используются в пищевой, химической, микробиологической и смежных отраслях промышленности и, как правило, связаны с переработкой материалов, состоящих из существенно неоднородных по размеру и плотности частиц. Такая неоднородность является причиной различной кинетики теплообменных процессов, химических и биохимических превращений в отдельных объемах сегрегированной рабочей среды.

Вследствие этого происходит снижение технико-экономических показателей функционирования оборудования, падение выхода продукции и ухудшение показателей ее качества.

Предварительное обеспечение однородности сырья и полуфабрикатов во многих случаях сопряжено со значительными техническими проблемами и, как правило, является технологически нецелесообразным, поскольку приводит к необходимости использования многопоточных технологических схем.

Во многом аналогичные проблемы возникают при переработке смесей зернистых материалов с высокой склонностью к сегрегации. С одной стороны, проблема возникает вследствие необходимости обеспечения условия однородности распределения частиц различного размера и плотности в рабочем объеме аппарата. Нарушение этого условия приводит к различному неконтролируемому времени пребывания неоднородных частиц в рабочем объеме аппарата и, в результате, становится причиной низкого качества продукта.

С другой стороны, легко сегрегирующие компоненты затрудняют получение однородной смеси, что предъявляет особые требования к смесительному оборудованию.

Анализ перечисленных проблем показывает, что во всех случаях они являются следствием того, что при переработке неоднородных материалов в объемах машин и аппаратов формируются сегрегированные потоки смеси, которые состоят из более однородных частиц, чем технологический поток в целом, занимают доминантные для них области рабочего объема и отличаются друг от друга структурными и кинематическими характеристиками. Традиционная практика решения названных проблем заключается в использовании различного рода средств для разрушения сегрегированных потоков (сегрегированных объемов) зернистой среды с целью предотвращения их развития. В общем случае такой подход недостаточно эффективен в связи с избыточными энергозатратами и локальным характером эффекта разрушения. Кроме того, вследствие эффектов разрушения происходит дополнительное перемешивание технологических потоков, что вызывает неконтролируемое нарушение их структуры, сопровождающееся увеличением неоднородности распределения времени пребывания отдельных частиц в рабочем объеме машин и аппаратов.

Для решения проблемы в рамках исследований, проводимых на базе межотраслевой научно-исследовательской лаборатории «Механика сдвиговых течений зернистых сред» кафедры «Технологическое оборудование и пищевые технологии» (ТО и ПТ), предложен принцип организации технологических процессов с управляемыми сегрегированными потоками. При этом сегрегированные потоки являются частями общего технологического потока перерабатываемого дисперсного материала, которые образуются в результате либо спонтанного, либо искусственно инициированного проявления эффектов сегрегации. Управление потоками предполагает изменение их величины и направления с целью достижения необходимого технологического результата.

Преимуществом принципа управления сегрегированными потоками является то, что его реализация может быть многовариантной и направленной на достижение различных и, в том числе, противоположных технологических целей. В числе таких технологических целей могут быть названы:

- дифференциация режима обработки неоднородных частиц за счет управления их временем пребывания в рабочем объеме машин и аппаратов, которое достигается в результате изменения скорости сегрегированных потоков;

- повышение качества смесей трудносмешиваемых компонентов, склонных к сегрегации, за счет управления направлением и величиной сегрегированных потоков, в результате которого интенсифицируется продольное и поперечное перемешивание компонентов;

- организация процесса сегрегации (классификации) традиционно трудно-разделяемых смесей дисперсных материалов за счет усиления и отделения противоточно направленных сегрегированных потоков смеси.

Образованием сегрегированных потоков сопровождается большинство тепломассообменных и гидромеханических процессов переработки дисперсных материалов (сушки, термообработки, гранулирования, измельчения, смешения, классификации), связанных со взаимным перемещением частиц. С учетом различных вариантов использования принципа управления сегрегированными потоками при организации такого рода процессов появляется возможность не только повышения их эффективности, но и совмещения процессов. В результате названный принцип может быть использован для создания гибких технологических модулей, обеспечивающих организацию различных тепломассообменных, гидромеханических и, в том числе, совмещенных процессов.

При оснащении аппарата традиционной конструкции такого рода устройством управления становится возможным поддерживать различное время технологической обработки частиц, различающихся по размеру и плотности. Если же приоритетной технологической операцией является получение качественной смеси, то время пребывания неоднородных компонентов в рабочем объеме выравнивается и в нем организуются потоки продольного и поперечного перемешивания. Для достижения же обратного эффекта с целью организации процессов сепарации или классификации по размеру и плотности частиц в рабочем объеме усиливаются продольные встречные сегрегированные потоки.

Прогнозирование величины и состава сегрегированных потоков, необходимое для проектирования соответствующего оборудования, осуществляется методом математического моделирования эффектов сегрегации и миграции неоднородных частиц в сдвиговых потоках сыпучих материалов. Процесс сегрегации – отделения однородных элементов из дисперсной среды сложного состава – доминирует в условиях относительно высоких значений структурной однородности сдвигового потока и концентрации твердой фазы. Напротив, миграция – квазидиффузионное разделение частиц – преобладает в условиях структурной неоднородности дисперсной среды и низких значений концентрации твердой фазы.

В настоящее время разработана теоретическая база, позволяющая определять величину потоков сегрегации и миграции при сдвиговой деформации и быстром сдвиговом течении несвязных сферических частиц [13–21]. При этом для прогнозирования динамики полей концентрации неоднородных частиц условно бинарной смеси необходимо располагать информацией о традиционных физико-механических характеристиках частиц и сыпучих материалов и определить единственную экспериментальную кинетическую характеристику (коэффициент сегрегации) для данной пары компонентов смеси. Величина потоков сегрегации и миграции определяется в зависимости от размера частиц, структурных и кинематических параметров потока (скорости сдвига и порозности).

На основе результатов исследования специфики сегрегированных потоков в аппаратах традиционных конструкций разработаны способы и устройства для управления величиной и направлением названных потоков. Технические решения, наработанные в процессе исследований, защищены 35 авторскими свидетельствами и патентами на изобретение и нашли применение: в химической промышленности – для организации совмещенного процесса гранулирования-сушки-классификации минеральных удобрений; в металлургии – для выделения немагнитного металлоконцентрата из шлаков производства ферросплавов; в сельском хозяйстве – для сепарации, тонкой очистки и калибровки семян злаковых, крупяных, бобовых культур и подсолнечника.

Разработка технологий производства функциональных продуктов питания

При решении важных проблем в области политики здоровья населения значительная роль отводится разработке, производству и продвижению на рынок продуктов питания функционального и лечебно-профилактического назначения. Среди многообразия предлагаемой из этого сегмента продукции исключительно высокое медико-биологическое значение принадлежит молочным продуктам, сахарным и мучным кондитерским изделиям, производство которых является крупным, хорошо развитым и быстро расширяющимся сектором пищевой промышленности.

С целью проведения совместных научных исследований, решения насущных производственных задач и повышения качества подготовки кадров с высоким уровнем профессиональной компетенции для предприятий пищевой и перерабатывающей промышленности в ТГТУ, ОАО «Орбита» и ОАО «Кондитерская фирма ТАКФ» создан Научно-образовательный центр в области биотехнологических про-

цессов, технологий комбинированных молочных продуктов и кондитерских изделий функционального назначения с улучшенными органолептическими, физико-химическими и микробиологическими показателями и увеличенным сроком хранения. Научные исследования и практические разработки Научно-образовательного центра «ТГТУ – ОАО «Орбита» – ОАО «Кондитерская фирма ТАКФ» ориентированы на создание новых видов продукции, сохраняющих здоровье здорового человека.

Ассортимент выпускаемых молочных продуктов на предприятиях Тамбовской области отличается разнообразием: это и мягкие, рассольные сыры, переработанные или плавленные сыры, творог, сливочное масло, которое требует значительных объемов молочного сырья. При формировании ассортимента молочных продуктов учитываются такие важные аспекты как увеличение доли людей пожилого возраста в Тамбовской области, увеличение стрессовой нагрузки в современных условиях жизни, повышенное внимание к качеству и безопасности пищевых продуктов, покупательная способность населения, а также состояние сельскохозяйственной базы по производству молока, которое в ближайшее время вряд ли изменится в сторону увеличения объемов сырья. Поэтому для молокоперерабатывающих предприятий также актуально направление по разработке продуктов питания с комбинированным составом – из компонентов животного и растительного происхождения, комплексное использование составных частей молока, увеличение сроков годности продукции.

Особое место занимают рецептуры поликомпонентных молочно-растительных продуктов функционального назначения. Растительные добавки, вводимые в молочную основу, выступают не только источником пищевых волокон, но и обогащают продукты витаминами, минеральными веществами. При разработке технологии и рецептур этой категории продуктов решаются такие важные задачи как придание продуктам дополнительных свойств – функциональных, диетических, новых потребительских свойств, сочетание характерных признаков отдельных компонентов, увеличение сроков годности. Были проведены работы по изысканию растительного наполнителя и определению его массовой доли в продукте, исходя из рекомендуемых норм потребления пищевых веществ и формированию высоких потребительских достоинств у готового продукта. При выборе наполнителя учитывалась сочетаемость растительного и молочного сырья. В качестве добавок использовались овощи, фрукты, ягоды в виде пюре, желе или в свежем виде, а также овсяные хлопья «Геркулес». Высокие оценки у специалистов получили образцы продукта с добавлением тыквенного пюре. Для созданного поликомпонентного молочного продукта были разработаны технические условия, документация для производства его на предприятии [26, 27].

Для решения проблемы рационального использования компонентов молочной сыворотки и снижения негативного воздействия предприятия на экологическую обстановку были проведены работы по оптимизации режимов получения белковой массы из подсырной сыворотки и созданию рецептур на ее основе новых для данного предприятия молочных продуктов функционального назначения. Для выделения белков из сыворотки использовали термокислотную коагуляцию, кислотно-щелочной способ, сквашивание молочнокислыми бактериями в сочетании с термообработкой. Установлено, что приемлемым для предприятия способом является последний, так как белковая масса обладала приятным кисломолочным вкусом и запахом, а вторичная сыворотка, образующаяся как отход, может быть направлена в производство плавленных сыров [22, 28].

Для придания готовому продукту необходимых потребительских свойств был осуществлен подбор структурообразователя, обеспечивающего получение продукта с однородной консистенцией и структурой эластичного геля. С этой целью применялись следующие стабилизаторы: пектин, крахмал, камедь рожкового дерева, ксантановая камедь, каррагинан, гуаровая камедь. Для обеспечения необходимых показателей консистенции путем пробных варок было выбрано сочетание камедей ксантановой и рожкового дерева.

Изучение влияния соотношения дозы структурообразователей и количества сухих веществ на консистенцию полученных образцов продукта производилось путем дегустации по разработанной пятибалльной шкале с использованием коэффициентов весомости, учитывающих значимость каждого показателя. Вкус и запах молочного продукта не определялись в связи с тем, что выбранные добавки не оказывают существенного влияния на данные показатели. Разработана базовая рецептура функционального молочного продукта на основе сывороточной белковой массы, и предложена схема его производства [23].

В настоящее время из-за острого дефицита и высоких цен на сырье для производства колбасного сыра, а именно на сыры натуральные твердые и мягкие, творог, масло, производители вынуждены отступать от традиционных рецептов и вводить новые ингредиенты, которые ранее не использовались, например, растительный жир. В этом случае по опыту работы предприятия наблюдается изменение консистенции сыра в худшую сторону, она становится мягкой, мажущейся. Для обеспечения традиционных потребительских характеристик, которые искажаются при включении в рецептуры этой разновидности жировой основы, возникает необходимость корректирования консистенции путем введения дополнительных ингредиентов. Были проведены изыскания доступного, дешевого структурообразователя, хорошо сочетающегося с сырной массой, установлены оптимальные концентрации его, выяснен характер поведения в разных средах и термостабильность, величина которой важна при хранении и транспортировании продукта в летнее время [24, 25].

С целью расширения ассортимента мягких сыров была отработана технология получения мягкого витаминизированного сыра с добавлением ягод клюквы, что сообщает продукту более высокую биологическую ценность по сравнению с аналогами из-за присутствия флавоноидов и легкоусвояемых минеральных веществ клюквы, а также придает выраженный кислый вкус и оригинальный рисунок на срезе. Был получен патент РФ на изобретение № 2006121845/13(023715) от 19.06.2006 «Способ получения витаминизированного мягкого сыра» [43].

Кондитерские изделия из высококалорийных десертов в настоящее время превращаются в важные компоненты ежедневного пищевого рациона всех групп населения. В связи с этим изменяются требования к рецептурному составу кондитерских изделий, а модификация рецептурного состава требует изменения технологических параметров и машинно-аппаратурного оформления производства [29–32].

В настоящее время выполнены комплексные исследования, и обоснованы оптимальный состав рецептурных ингредиентов и технологические режимы получения конфет со сбивными, помадными, желевыми и комбинированными корпусами, разработаны математические модели для прогнозирования изменения качественных характеристик кондитерских изделий в процессе хранения, выполнено технико-экономическое обоснование предложенных рецептурных и технологических инноваций [33–42].

Важным показателем, влияющим на стабильность качественных характеристик конфет в процессе хранения, является влагоудерживающая способность рецептурных ингредиентов. Количество вносимых влагоудерживающих добавок влияет на начальную влажность корпуса конфет и динамику ее изменения в процессе хранения. При добавлении пищевых волокон (**ПВ**) потеря массовой доли влаги корпусом проходит менее интенсивно по сравнению с классической рецептурой (рис. 1). Аналогичная зависимость наблюдается и при частичной или полной замене сахарозы фруктозой, введении в конфетные массы фитодобавок.

Введение влагоудерживающих добавок позволяет обеспечить стабильность органолептических показателей конфет по сравнению с образцами конфет, приготовленными по традиционной рецептуре. Результаты сенсорной оценки конфет представлены на рис. 2.

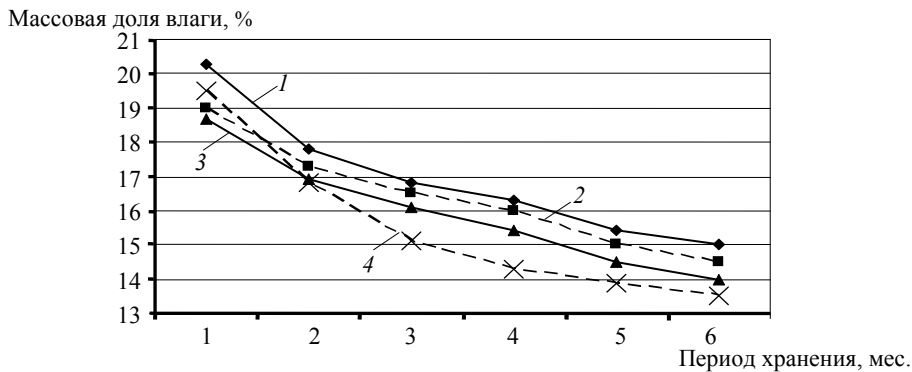


Рис. 1. Динамика изменения массовой доли влаги корпуса:
 1 – 1,5 % ПВ; 2 – 1,0 % ПВ; 3 – 0,5 % ПВ; 4 – 0 % ПВ

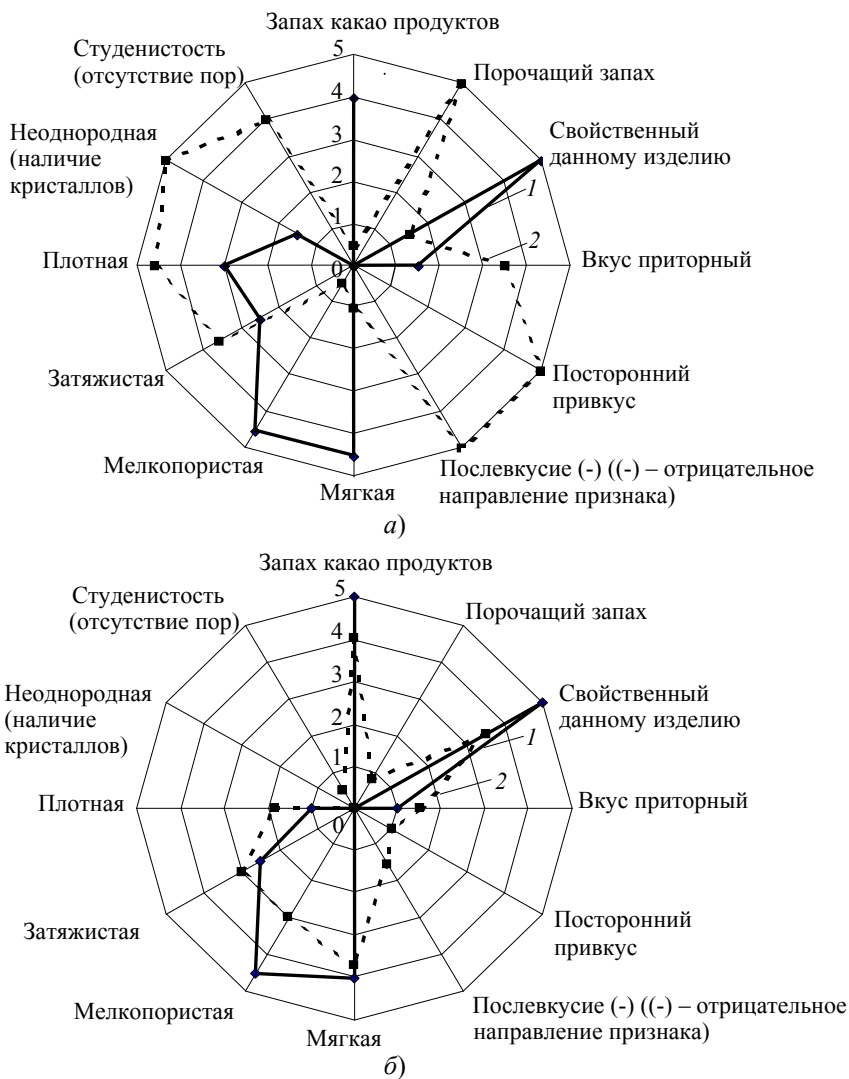


Рис. 2. Результаты сенсорной оценки образцов, приготовленных по традиционной (а) и новой (б) рецептурам:
 1 – первый месяц хранения; 2 – шестой месяц хранения

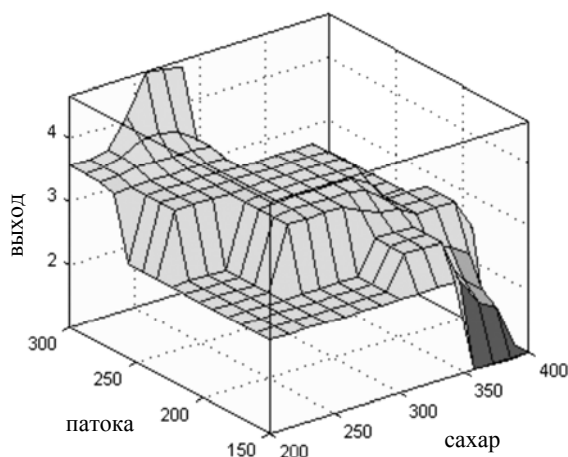


Рис. 3. Функция отклика органолептических характеристик кремово-сбивных конфет на изменение соотношения рецептурных ингредиентов

При проектировании многокомпонентных пищевых продуктов большое значение имеет возможность моделирования потребительских характеристик готовых изделий, прогнозирования их биологической безопасности, качества и функционально-технологических свойств с учетом явления синергизма. Для оптимизации рецептур конфет в соответствии с результатами физико-химического и сенсорного анализов были использованы экспертные системы с нечетким выводом (рис. 3).

На основании проведенных исследований разработаны рецептуры новых видов кондитерских изделий функционального назначения с улучшенными органолептическими, физико-химическими и структурно-механическими характеристиками.

В соответствии с модифицированными рецептурами внесены изменения в традиционные технологические схемы получения кремово-сбивных конфет и жировых вафельных начинок, и уточнены технологические режимы получения помадных и желейных масс. Проведена апробация разработанных технологий новых видов кондитерских изделий в опытно-промышленных условиях ОАО «Кондитерская фирма ТАКФ».

Определены направления дальнейших исследований, включающие:

- разработку обобщенного алгоритма проектирования рецептур кондитерских изделий функционального назначения;
- математическое моделирование рецептур и прогнозирование качества кондитерских изделий в процессе хранения;
- исследование реологических свойств конфетных масс с целью оптимизации параметров процессов формования и структурообразования и получения конфет с заданными структурно-механическими характеристиками.

Заключение

В заключение следует отметить, что основными научными направлениями, развиваемыми на кафедре ТО и ПТ за последнее десятилетие, являются:

- 1) интегрированное проектирование и управление химико-технологическими системами: стратегия, методы и применение (руководитель – д-р техн. наук, профессор С.И. Дворецкий);
- 2) технология и техника переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках (руководитель – д-р техн. наук, профессор В.Н. Долгунин);

3) развитие технологий производства пищевых продуктов функционального назначения (руководители – канд. техн. наук, доцент О.В. Зюзина, канд. пед. наук, доцент Е.И. Муратова).

Преподавателями и сотрудниками кафедры ТО и ПТ защищены 3 докторские и 25 кандидатских диссертаций, получено 55 патентов и авторских свидетельств, опубликовано 5 монографий, 27 учебников и учебных пособий, более 200 статей в ведущих научных журналах и сделано 58 научных докладов на международных симпозиумах и конференциях, около 10 студентов стали победителями открытого Всероссийского конкурса на лучшую научную работу, 4 научные работы студентов отмечены дипломами 1 и 2 степени на Всероссийском конкурсе научно-технических работ «Эврика 2006» и «Эврика 2007» (г. Новочеркасск, Южно-Российский государственный технический университет).

Список литературы

1. Бодров, В.И. Оптимальное проектирование энерго- и ресурсосберегающих процессов и аппаратов химической технологии / В.И. Бодров, С.И. Дворецкий, Д.С. Дворецкий // Теорет. основы хим. технологии. – 1997. – Т. 31, № 5. – С. 542–548.

2. Дворецкий, С.И. Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологических установок непрерывного действия / С.И. Дворецкий, В.В. Карнишев, Д.С. Дворецкий // Хим. и нефтегазовое оборудование. – 1998. – № 4. – С. 4–7.

3. Дворецкий, С.И. Универсальные алгоритмы оптимального управления / С.И. Дворецкий, И.Н. Мамонтов, А.А. Косенков // Изв. вузов. Приборостроение. – 1999. – № 1. – С. 30–35.

4. Dvoretzky, S.I. New Approaches to Environmentally Appropriate Automated Chemical Units / S.I. Dvoretzky, I.N. Mamontov // European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE'10) : Proceedings Supplement Volume. – Florence, Italy, 2000. – P. 135–140.

5. Dvoretzky, S.I. Strategy and Algorithms of Integrated Design of Energy- and Resource Saving Nonlinear Chemical Processes and Control Systems / S.I. Dvoretzky, D.S. Dvoretzky // European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE'11) : Proceedings Supplement Volume. – Scanticon Comwell Kolding, 2001. – P. 97–102.

6. Dvoretzky, S.I. Methods of Integrated Design of Flexible Chemical Processes and Automated Control Systems / S.I. Dvoretzky, D.S. Dvoretzky // IV European Congress of Chemical Engineering, Granada, Spain, 21–25 September, 2003. – Т. 9. Proceedings. – P. 154–159.

7. Дворецкий, Д.С. Постановка задач и проблемы интегрированного проектирования гибких автоматизированных химико-технологических процессов при наличии неопределенности / Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 3. – С. 360–381.

8. Dvoretzky, D.S. New problem statements, algorithms and problems of integrated design of flexible chemical processes and automatic control systems / D.S. Dvoretzky, S.I. Dvoretzky // European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE'14) : Proceedings. – Lisbon, Portugal, 2004. – P. 397–402.

9. Ostrovsky, G.M. Integrated design of energy-saving chemical process systems : strategy, methods and implementation / G.M. Ostrovsky, D.S. Dvoretzky, S.I. Dvoretzky // 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE'16) – Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2006. – P. 521–526.

10. Дворецкий, Д.С. Интегрированное проектирование энерго- и ресурсосберегающих химико-технологических процессов и систем управления: стратегия, методы и применение / Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий, Г.М. Островский // Теорет. основы хим. технологии. – 2008. – Т. 42, № 1. – С. 29–39.
11. Решение двухэтапной задачи стохастической оптимизации при проектировании комбинированной реакторной установки тонкого органического синтеза / Д.С. Дворецкий [и др.] // Хим. технология. – 2008. – № 2. – С. 67–73.
12. Dvoretzky, D.S. New method of stochastic optimization on example of cyclic reactor of thin organic synthesis / D.S. Dvoretzky, S.I. Dvoretzky, G.M. Ostrovsky // 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE'18). – Lyon, France, 2008. – P. 221–226.
13. Долгунин, В.Н. Сегрегация в зернистых средах: явление и его технологическое применение : монография / В.Н. Долгунин, А.А. Уколов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 180 с.
14. Долгунин, В.Н. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение : монография / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 112 с.
15. Dolgunin, V.N. Segregation modeling of particle rapid gravity flow / V.N. Dolgunin, A.A. Ukolov // Powder Technology. – 1995. – No. 83. – P. 95–103.
16. Dolgunin, V.N. Development of the model of segregation of particles undergoing granular flow down on inclined chute / V.N. Dolgunin, A.N. Kudi, A.A. Ukolov // Powder Technology. – 1998. – No. 56 – P. 211–218.
17. Долгунин, В.Н. Исследование закономерностей быстрого гравитационного течения зернистой среды / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев, П.А. Иванов // Теорет. основы хим. технологии. – 2005. – Т. 39, № 5. – С. 597.
18. Долгунин, В.Н. Кинетические закономерности сегрегации при быстром гравитационном течении зернистых материалов / В.Н. Долгунин, А.А. Уколов, О.О. Иванов / Теорет. основы хим. технологии. – 2006. – Т. 40, № 4. – С. 423–435.
19. Долгунин, В.Н. Температура зернистой среды и физические эффекты взаимодействия частиц при быстром сдвиговом течении зернистых материалов / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев // Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, № 8. – С. 78.
20. Долгунин, В.Н. Сегрегация при сдвиговой деформации зернистой среды / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев, Р.А. Шубин // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 1. – С. 7–10.
21. Долгунин, В.Н. Сегрегация при сдвиговой деформации зернистой среды / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев, П.А. Иванов // Теорет. основы хим. технологии. – 2008. – Т. 42, №3. – С. 343–347.
22. Особенности развития молочнокислых бактерий на сыворотке / О.В. Зюзина [и др.] // Прогрессивные технологии и оборудование для пищевой промышленности : сб. материалов II междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию заслуж. деятеля науки и техники РСФСР проф. В.И. Попова. В 2 ч. / Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж, 2004. – Ч. 1. – С. 200–202.
23. Романов, А.А. Автоматизированный продуктовый расчет рецептур в производстве плавящихся сыров / А.А. Романов, О.О. Иванов, О.В. Зюзина // Математические методы в технике и технологии : сб. тр. 17-й междунар. науч. конф. / Костром. гос. технол. ун-т. – Кострома, 2004. – Т. 10. – С. 115–116.
24. Формирование потребительских свойств комбинированных продуктов питания / О.В. Зюзина [и др.] // Труды Тамб. гос. техн. ун-та : сб. науч. ст. молодых учен. и студентов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2004. – Вып. 15. – С. 120–122.

25. Муратова, Е.И. Управление качеством производства плавленых и мягких сыров / Е.И. Муратова, О.В. Зюзина, Н.М. Страшнов // Качество науки – качество жизни : сб. науч. ст. по материалам 1-й междунар. науч.-практ. конф. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2005. – С. 210–212.

26. Зюзина, О.В. Влияние растительных добавок на реологию плавленого сыра / О.В. Зюзина, И.В. Голикова, Н.М. Страшнов // Прогрессивные технологии развития : сб. материалов 2-й междунар. науч.-метод. конф. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2005. – С. 293–294.

27. Использование натурального растительного сырья при разработке поликомпонентных молочных продуктов / О.В. Зюзина [и др.] // Научное обеспечение развития агропродовольственного рынка и повышения конкурентоспособности регионального АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф., 23–24 апреля 2008 г. / Мич. гос. агр. ун-т. – Мичуринск, 2008. – С. 389–395.

28. Особенности использования вторичного сырья в условиях предприятия средней мощности / О.В. Зюзина [и др.] // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование : сб. тр. XIII науч. конф. ТГТУ / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2008. – С. 123–127.

29. Савенкова, Т.В. Научные основы повышения конкурентоспособности кондитерской продукции / Т.В. Савенкова // Кондит. пр-во. – 2002. – № 7. – С. 10–12.

30. Резниченко, И.Ю. Сахаристые кондитерские изделия функционального назначения: состояние рынка, методологические аспекты / И.Ю. Резниченко // Кондит. пр-во. – 2004. – № 2. – С. 38–40.

31. Плаксин, Ю.М. Совершенствование технологии кондитерских изделий функционального назначения / Ю.М. Плаксин, М.Г. Куликова // Обществ. питание: соврем. тенденции. – 2007. – № 2 (2). – С. 24–38.

32. Олейников, А.Я. Проектирование кондитерских предприятий : учебник / А.Я. Олейников, Г.О. Магомедов, Г.П. Мальцев. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. технол. акад., 2002. – 212 с.

33. Муратова, Е.И. Влияние технологических параметров на реологические свойства конфетных масс / Е.И. Муратова, Н.В. Донских // Наука на рубеже тысячелетий : сб. докл. междунар. конф. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2004. – С. 291–292.

34. Муратова, Е.И. Конструктивные и технологические приемы повышения качества кондитерских изделий / Е.И. Муратова // Качество науки – качество жизни : сб. науч. ст. по материалам 1-й междунар. науч.-практ. конф. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2005. – С. 215–218.

35. Муратова, Е.И. Исследование реологических свойств вафельных начинок / Е.И. Муратова, А.А. Смаглий // X научная конференция ТГТУ : сб. тез. докл. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2005. – С. 190–191.

36. Муратова, Е.И. Анализ стабильности функционирования линии по производству глазированных жележных конфет на основе теории технологического потока / Е.И. Муратова // Достижения ученых XXI в. : сб. науч. ст. междунар. науч.-практ. конф. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2005. – С. 210–213.

37. Донских, Н.В. Управление качеством сбивных конфетных масс / Н.В. Донских, Е.И. Муратова, П.М. Павленко // Прогрессивные технологии развития : сб. науч. ст. междунар. науч.-практ. конф. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2006. – С. 299–301.

38. Донских, Н.В. Способы повышения влагоудерживающей способности помадного слоя комбинированных помадно-жележных конфет / Н.В. Донских,

Е.И. Муратова, Н.А. Ивойлова // Прогрессивные технологии развития : сб. науч. ст. междунар. науч.-практ. конф. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2006. – С. 325–329.

39. Муратова, Е.И. Использование методов нечеткого моделирования при проектировании рецептур конфет / Е.И. Муратова, М.В. Брусенцова // XX международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» : сб. тр. / Донской гос. техн. ун-т. – Ростов н/Д, 2007. – Т. 10. – С. 176–179.

40. Муратова, Е.И. Формализация технологического процесса производства сбивных конфет на базе системного анализа / Е.И. Муратова, М.Н. Романенко // XX международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» : сб. тр. / Донской гос. техн. ун-т. – Ростов н/Д, 2007. – Т. 10. – С. 174–176.

41. Муратова, Е.И. Разработка технологии сбивных конфет типа «Птичье молоко» с улучшенными потребительскими характеристиками / Е.И. Муратова, М.Н. Романенко // Сборник конкурсных работ Всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «ЭВРИКА-2007» / Южно-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 2007. – С. 232–233.

42. Муратова, Е.И. Разработка рецептур кремово-сбивных конфет функционального назначения / Е.И. Муратова, Н.В. Донских, П.М. Смолихина // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование : сб. науч. ст. XIII науч. конф. ТГТУ / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2008. – С. 127–131.

43. Пат. 2325065 Российская Федерация, МПК⁶ А 23 С 19/076. Способ получения витаминизированного мягкого сыра / Страшнов Н.М., Филлипова О.В., Алешина Н.П., Зюзина О.В., Голикова И.В. ; заявители и патентообладатели Тамб. гос. техн. ун-т, ОАО «Орбита». – № 2006121845/13 ; заявл. 19.06.06 ; опубл. 27.05.08, Бюл. № 15. – 4 с.

Equipment and Technologies Advancement for Food and Chemical Industries: System Approach

S.I. Dvoretzky, V.N. Dolgunin, O.V. Zyuzina, E.I. Muratova

Department “Production Equipment and Food Technologies”, TSTU

Key words and phrases: food technology; functional foodstuffs; instrumental technological typography; integrated designing; processing of grain materials; quick gravitation flows; segregation; system of computer-aided designing.

Abstract: The paper presents the main scientific direction of the Department “Production Equipment and Food Technologies” of TSTU. The methods and the set of fast working algorithms for solving the tasks of modeling and optimization in the course of designing flexible automated plants in terms of uncertainty of physical, chemical, technological and economic data are developed. The methodology and software for integrated designing of technological processes and systems of control as single automated complex are created; the algorithms and programs for simulated modeling of these complexes “technological object – CAD” are designed. The paper works out the theoretical basis for determining the amount of segregation and migration flows under shift deformation and quick shift flow of disconnected spherical particles. Thus, to forecast the dynamics of concentration fields of heterogeneous particles of conditionally binary mixture it is necessary to have information about conventional

physic-mechanical properties of particles and grain materials and determine the only experimental kinetic characteristic (segregation coefficient) for the given pair of mixture components. The value of segregation and migration flows is determined on the basis of the particles size, structural and kinematic parameters of the flow (shift velocity and porosity). The technologies for combined dairy products and confectionary products with improved organoleptic, physico-chemical and microbiological indexes and extended shelf life, contributing to the maintenance of people's health.

Entwicklung der Technik und der Technologien der Nahrungs- und Chemieproduktionen: Systemherangehen

Zusammenfassung: Es sind die wissenschaftlichen Hauptrichtungen des Lehrstuhls «Technologische Ausrüstung und die Nahrungstechnologien» GOU WPO «TSTU» dargelegt. Es sind die Methoden und den Komplex der schnellwirkenden Lösungsalgorithmen der Aufgaben der Modellierung und der Optimierung bei der integrierten Projektierung der flexiblen automatisierten Produktionen unter den Bedingungen der Unbestimmtheit der physikalischen, chemischen, technologischen und ökonomischen Informationen entwickelt. Es sind die Methodologie und die Software der integrierten Projektierung der technologischen Prozesse und der Steuersysteme wie des einheitlichen automatisierten Komplexes geschaffen, es sind die Algorithmen und die Programme der Imitationmodellierung dieser Komplexe «technologisches Objekt – System der automatischen Steuerung» entwickelt. Es ist die theoretische Basis entwickelt, die die Größe der Ströme der Segregation und der Migration bei der Schiebedeformation und der schnellen Schiebeströmung der unzusammenhängenden sphärischen Teilchen zu bestimmen erlaubt. Dabei muss man für die Prognostizierung der Dynamik der Felder der Konzentration der ungleichartigen Teilchen der bedingtbinären Mischung über die Informationen über die traditionellen physikalisch-mechanischen Charakteristiken der Teilchen und der streubaren Materialien verfügen und die einzige experimentale kinetische Charakteristik (Koeffizient der Segregation) für das vorliegende Paar Komponenten der Mischung bestimmen. Die Größe der Ströme der Segregation und der Migration wird je nach dem Umfang der Teilchen, der strukturellen und kinematischen Parameter des Stroms (Geschwindigkeit der Verschiebung und Leerraumanteil) bestimmt. Es sind die Technologien der kombinierten Milchlebensmittel und der Konditorerzeugnisse der funktionalen Bestimmung mit den verbesserten organoleptischen, physikalisch-chemischen und mikrobiologischen Kennziffern und auch mit der vergrößerten Aufbewahrungsfrist entwickelt.

Développement de la technique et des technologies des productions chimiques et alimentaires: approche systémique

Résumé: Sont présentées les principales orientations scientifiques du travail de la chaire «Équipement technologique et technologies d'alimentation» de l'Université technique d'état de Tambov. Sont élaborées des méthodes et une série d'algorithmes rapides de la solution des problèmes du modélage et d'optimisation lors de la conception des productions flexibles automatisées dans les conditions de

l'indétermination de l'information physique, chimique, technologique et économique. Sont créés les méthodes et le logiciel pour la conception intégrée des processus technologiques ainsi que le système de la commande comme un complexe unique automatisé, sont élaborés les algorithmes et les programmes du modélage d'imitation de ces complexes «objet technologique – système de la commande automatisée». Est élaborée une base théorique permettant de définir la valeur des flux de ségrégation et des migrations lors de la déformation et l'écoulement rapide de décalage des particules sphériques non liées. De plus pour la prévision de la dynamique des champs de concentration des particules hétérogènes du mélange binaire par convention il faut posséder de l'information sur les caractéristiques physiques et mécaniques traditionnelles des particules et des matériaux poreux et définir une seule caractéristique expérimentale cinétique (coefficient de ségrégation) pour une paire donnée des composants du mélange. La grandeur des flux de ségrégation et des migrations est définie en fonction des dimensions des particules, des paramètres cinématiques et structurels du flux. Sont élaborées les technologies des produits de lait combinés et des confiseries de la destination fonctionnelle avec les indices organoleptiques, physiques, chimiques et microbiologiques améliorés et la durée de validité augmentée, orientés sur la protection de la santé d'un homme bien portant.
