

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

О. В. Агеев

РЕОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ МАСС

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,
обучающихся в магистратуре по направлению подготовки
19.04.04 Технология продукции и организация общественного питания

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2022

Рецензент

кандидат технических наук, доцент, зам. директора института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «КГТУ» по основной образовательной деятельности, доцент кафедры технологии продуктов питания
М. Н. Альшевская

Агеев, О. В.

Реология пищевых масс: учеб.-метод. пособие по изучению дисциплины для студ. магистратуры по напр. подгот. 19.04.04 Технология продукции и организация общественного питания / О. В. Агеев. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 55 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Реология пищевых масс» представлены учебно-методические материалы по освоению тем лекционного курса, включающие подробный план лекции по каждой изучаемой теме, вопросы для самоконтроля, материалы по подготовке к практическим занятиям.

Табл. 3, список лит. – 16 наименований

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 21 апреля 2022 г., протокол № 3

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического массы методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет 30 октября 2022 г., протокол № 11

УДК 658.512.26

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2022 г.
© Агеев О. В., 2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	8
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	53

ВВЕДЕНИЕ

Выпуск высококачественной пищевой продукции является важнейшей задачей предприятий общественного питания независимо от их отраслевой принадлежности. Успешное решение этой задачи в немалой степени зависит от знаний свойств перерабатываемого сырья и особенностей строения пищевых масс.

Создание новых эффективных технологий, как и оптимизация существующих технологических процессов, неосуществимы без изучения закономерностей поведения пищевых масс при их обработке в рабочих зонах машин и аппаратов.

При проектировании новых конструкций технологического оборудования необходимо знать характеристики сырья и полуфабрикатов, например их плотность, вязкость, прочность, податливость и др., а также уметь оценивать степень их влияния на выходные параметры готовой продукции и эксплуатационные показатели самого оборудования.

Изучение реологических свойств сырья и готовой продукции базируется на положениях механики сплошных сред и принципах инженерной реологии как составной ее части, в которой исследуется деформационное поведение обрабатываемых масс в зависимости от различных внутренних и внешних факторов. Поэтому свойства и реологическое поведение пищевых масс рассматриваются с позиций влияния на них соотношений между действующими напряжениями, деформациями и скоростями деформаций.

Инженерная реология как наука включает два раздела:

- первый посвящен изучению реологических или в общем смысле структурно-механических свойств реальных тел;
- второй рассматривает движение реальных тел в рабочих зонах машин и аппаратов и разрабатывает инженерные способы расчета рабочих органов с учетом реологических свойств обрабатываемой массы.

Механические свойства являются основными свойствами большинства пищевых продуктов, отражающими общие закономерности их строения и имеющими практическое значение. В тоже время под влиянием различных факторов внешней среды и режимов обработки происходящие изменения механических свойств перерабатываемых продуктов часто сопровождаются изменением химического состава.

Учитывая, что механические свойства масс непосредственно связаны со строением и действующими в массах молекулярными силами, эти свойства, вследствие наличия таких связей, рассматриваются как структурно-механические. Под структурой в данном случае понимается пространственная решетка, характерная для твердообразных пищевых продуктов и образуемая взаимодействием друг с другом атомов, ионов, молекул или коллоидных частиц. Такая структура представляет собой правильную решетку, характерную для твердых кристаллических тел, или каркас, заполненный аморфными веществами, как это имеет место в коагуляционных структурах, гелях и студнях. Различие между жидкостями и твердыми телами не является резким и носит

кинетический (релаксационный) характер. При этом между предельными состояниями упругих твердых тел и вязкими жидкостями существует ряд переходов, обуславливающих все многообразие реальных продуктов. Так, например, сахар, жиры и другие продукты в зависимости от температуры и давления могут находиться в твердом или жидком состоянии. При переходе из кристаллического состояния в пластичное аморфное состояние структура продукта нарушается, и чем больше будет степень разрушения структуры, тем больше будет текучесть деформируемого продукта.

Поскольку основная цель физико-химической механика состоит в установлении закономерностей получения различных масс с заданными механическими свойствами, то применительно к пищевой промышленности цель заключается в разработке научных основ технологии получения готовой продукции с требуемыми механическими свойствами и структурой. Реализация данной цели позволит получать готовую продукцию нужного качества, а также будет способствовать энерго- и ресурсосбережению при механической обработке с помощью совместного использования физико-химических и механических факторов.

Дисциплина «Реология пищевых масс» является дисциплиной, формирующей у обучающихся готовность к профессиональной деятельности в области технологии продукции и организации общественного питания.

Целью дисциплины «Реология пищевых масс» является формирование знаний, умений и навыков, необходимых в профессиональной деятельности магистра в области проектирования и эксплуатации технологического оборудования предприятий общественного питания, а также при исследованиях структурно-механических свойств сырья, полуфабрикатов и готовых продуктов на основе теоретических и экспериментальных методов.

Задачами изучения дисциплины являются следующие мероприятия:

- приобретение студентами представлений в области реологических свойств пищевых масс;
- формирование понимания студентами физической сущности, структурно-механических характеристик пищевых продуктов;
- развитие умения оценки реологических характеристик сырья и использования их для расчета технологических процессов общественного питания, в которых они осуществляются, а также создания предпосылки для их механизации и автоматизации.

Результатами освоения дисциплины является поэтапное формирование требуемых компетенций у обучающихся.

При реализации дисциплины «Реология пищевых масс» организуется практическая подготовка путем проведения практических занятий и лабораторных работ, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- основы теоретической и экспериментальной реологии пищевых масс с целью контроля технологических процессов и инструментальной оценки консистенции сырья и продуктов животного происхождения;

уметь:

- выполнять технологические расчеты по реологическим показателям и решать практические задачи;

владеть:

- методами экспериментальной реологии (реометрии) для определения основных реологических показателей в производственных лабораториях и научных исследованиях.

Для успешного освоения дисциплины «Реология пищевых масс», студент должен активно работать на лекционных и практических занятиях, организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность.

Для оценивания поэтапного формирования результатов освоения дисциплины (текущий контроль) предусмотрены практические задания. Решение практических задач обучающимися проводится на практических занятиях после изучения соответствующих тем.

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства поэтапного формирования результатов освоения;
- оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам поэтапного формирования результатов освоения дисциплины относятся:

- контрольные вопросы для практических занятий;
- контрольные вопросы для лабораторных работ.

К оценочным средствам для промежуточной аттестации по дисциплине, проводимой в форме зачета, соответственно относятся:

- вопросы к зачету по дисциплине.

Промежуточная (заключительная) аттестация по дисциплине проводится в форме зачета. К зачету допускаются студенты:

- положительно аттестованные по результатам освоения дисциплины.

Универсальная система оценивания результатов обучения приведена в таблице 1 и включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100-балльную (процентную) систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему.

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
Критерий				
1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно-корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полной полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
	собой)			
2. Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные данные	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

При необходимости для обучающихся инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом его индивидуальных психофизических особенностей.

Для успешного освоения дисциплины «Реология пищевых масс» в учебно-методическом пособии по изучению дисциплины приводится краткое содержание каждой темы занятия, перечень вопросов для подготовки к практическим занятиям и организации самостоятельной работы студентов.

1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Осваивая курс «Реология пищевых масс», студент должен научиться работать на лекциях, практических занятиях и организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность. В начале лекции необходимо уяснить цель, которую лектор ставит перед собой и студентами. Важно внимательно слушать, отмечать наиболее существенную информацию и кратко ее конспектировать; сравнивать то, что услышано на лекции с прочитанным и усвоенным ранее материалом в области методологии научно-исследовательской деятельности, укладывать новую информацию в собственную, уже имеющуюся, систему знаний. По ходу лекции необходимо подчеркивать новые термины, определения, устанавливать их взаимосвязь с изученными ранее понятиями.

Основными видами учебной деятельности в ходе изучения курса являются лекции, практические занятия, консультирование по решению практических заданий.

При разработке образовательной технологии организации учебного процесса основной упор сделан на соединение активной и интерактивной форм обучения. Интерактивная форма позволяет студентам проявить самостоятельность в освоении теоретического материала и овладении практическими навыками, формирует интерес и позитивную мотивацию к учебе.

При чтении лекций преподаватель имеет право самостоятельно выбирать формы и методы изложения материала, которые будут способствовать качественному его усвоению. При этом преподаватель в установленном порядке может использовать технические средства обучения, имеющиеся на кафедре и в университете.

Вместе с тем, всякий лекционный курс является в определенной мере авторским, представляет собой творческую переработку материала и неизбежно отражает личную точку зрения лектора на предмет и методы его преподавания. В этой связи представляется целесообразным привести некоторые общие методические рекомендации по построению лекционного курса и формам его преподавания.

Лекции составляют основу теоретической подготовки и посвящены наиболее важным моментам по исследованию реологических свойств сырья и готовой продукции. При проведении лекций необходимо использовать технические средства обучения, ЭИОС, применять методы, способствующие активизации познавательной деятельности слушателей. На лекциях целесообразно теоретический материал иллюстрировать рассмотрением различных примеров и конкретных задач. Имеет смысл привлекать студентов к обсуждению как рассматриваемого вопроса в целом, так и отдельных моментов рассуждений и доказательств. Необходимо также использовать возможности проблемного изложения, дискуссии с целью активизации деятельности

студентов. Важную роль играет привлечение студентов к научно-исследовательской деятельности.

Практические занятия проводятся для закрепления основных теоретических положений курса и реализации их в практических расчетах, формирования и развития у студентов мышления в рамках будущей профессии.

На практических занятиях следует добиваться точного и адекватного владения теоретическим материалом и его применения для решения задач.

Важным звеном во всей системе обучения является самостоятельная работа обучающихся. В широком смысле под ней следует понимать совокупность всей самостоятельной деятельности студентов, как в отсутствии преподавателя, так и в контакте с ним. Она является одним из основных методов поиска и приобретения новых знаний, работы с литературой, а также выполнения предложенных заданий. Преподаватель призван оказывать в этом методическую помощь студентам и осуществлять руководство их самостоятельной работой.

Необходимо контролировать степень усвоения студентами текущего материала, а также уровень остаточных знаний по уже изученным темам.

При изучении курса предусмотрены следующие формы текущего контроля:

- опросы по теоретическому материалу;
- контроль на практических занятиях.

Промежуточный контроль осуществляется в форме сдачи экзамена и имеет целью определить степень достижения учебных целей по дисциплине.

С целью формирования мотивации и повышения интереса к предмету особое внимание при чтении курса необходимо обратить на темы, которые можно проиллюстрировать примерами из практической сферы, связывая теоретические положения с будущей профессиональной деятельностью студентов.

Тематический план лекционных занятий представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Объем (трудоемкость освоения) и структура лекционных занятий направления «Технология продукции и организация общественного питания»

Номер темы	Содержание лекционного занятия	Кол-во часов ЛЗ
1	Основные понятия инженерной реологии пищевых масс	2
2	Реологические свойства пищевых продуктов	2
3	Моделирование реологического поведения пищевых масс	2
4	Методы и средства измерения реологических свойств пищевых масс	1
5	Особенности строения частиц сыпучих масс и их свойства	1
6	Физико-механические свойства сырья, полуфабрикатов и готовой продукции	1
7	Реологические свойства коллоидных систем	1
Итого		10

Если лектор приглашает студентов к дискуссии, то необходимо принять в ней активное участие. Если на лекции студент не получил ответа на возникшие у него вопросы, он может в конце лекции задать эти вопросы лектору курса дисциплины.

Тема 1. Основные понятия инженерной реологии пищевых масс

Ключевые вопросы темы

1. Определение деформации массы.
2. Определение напряжения в точке.
3. Понятие абсолютной упругости тела.
4. Понятие вязкости тела.
5. Виды нагружения масс.
6. Виды объемных сил.

Ключевые понятия: деформация, напряжение, упругость, вязкость, нагружение, вязкоупругость, объемная сила, тензор напряжений.

Литература: [9, с. 12–37]

Методические рекомендации

Первая тема курса дисциплины направлена на получение у обучающихся представления о базовых понятиях дисциплины, определении места дисциплины в структуре образовательной программы, планируемых результаты освоения дисциплины, возможных рисках освоения дисциплины, знакомит обучающихся с формами текущего и промежуточного контроля.

В основе реологии как науки о течениях и деформациях масс лежит классическая механика сплошных сред, основными задачами которой является изучение состояния и поведения различных масс с геометрических (деформации), кинематических (скорости деформаций) и динамических (напряжения) позиций.

В процессе обработки пищевое сырье и полуфабрикаты подвигаются внешним механическим и другими видами воздействий, в результате которых внутри тел в любой их точке возникают динамические состояния, характеризующиеся определенной физической величиной, называемой напряжением. Напряжения возникают только внутри вещества и обуславливаются силами, действующими в данный момент на тело.

Следствием действия внешних нагрузок и возникающих внутри тела напряжений является перемещение этого тела в пространстве или изменение его формы. Изменение формы проявляется в изменении расстояний между различными точками внутри тела по всему его объему, что собственно и называется деформацией тела, при этом непрерывность самого тела не нарушается.

Деформация, которая исчезает при снятии внешней нагрузки, называется упругой деформацией. Упругость – это свойство деформированных тел восстанавливать свою форму. При отсутствии напряжений будет отсутствовать и упругая деформация.

Если под действием внешней нагрузки деформация тела увеличивается во времени и является необратимой, то данное явление означает, что материал течет. Различают вязкое и пластичное течения. Вязкое течение происходит под

действием любой по величине нагрузки, однако скорость деформации уменьшается при ее снижении, а при снятии нагрузки деформация прекращается. Пластичное течение возникает при превышении силами некоторого предела, называемого пределом текучести массы, или пределом напряжения сдвига. У вязких и пластичных тел деформация после разгрузки сохраняется.

Определить вид деформации можно с помощью диаграммы нагружения – разгрузки, показывающей, какая часть из общей деформации образца является обратимой или упругой.

Исследование различных видов деформации в зависимости от соответствующих напряжений и составляет предмет реологии. Деформации, возникающие при действии напряжения, следует отличать от других видов деформации (из-за дислокаций в материале, температурных и др.). Например, если изменение объема тела происходит в результате изменения температуры (высушивание, фильтрация влаги при намокании и т.п.) и не связано с изменением напряжения, то эти изменения не являются предметом реологии, хотя их приходится учитывать в исследованиях реологического поведения тел.

Многие материалы, используемые пищевой промышленностью для производства продуктов питания, могут рассматриваться в виде системы большого количества материальных точек и быть представлены моделями сплошной среды.

Среда называется сплошной, если любой объем, выделенный из нее, имеет массу. Классическая модель сплошной среды представляет собой множество материальных точек, при этом каждая точка интерпретируется в виде сферы бесконечно малого радиуса. Единственной величиной, характеризующей такую точку, является радиус – вектор центра сферы или три проекции центра на оси координат.

При движении среды под действием внешних сил координаты точки изменяются и в момент t принимают значения $x_i(t)$, $i=1,2,3$. Движение среды полностью задано, если функции $x_i(t)$, $i=1,2,3$ для каждой точки среды будут известны.

Сохранение формы тела как в статике, так и в динамике обеспечивается действием внутренних сил или напряжениями, возникающими внутри тела. Через любую внутреннюю точку тела можно провести бесчисленное множество поверхностей, по-разному ориентированных в пространстве. Если ограничить ту или иную поверхность каким-то контуром, включающим данную точку, то ее ориентация определится единичным вектором нормали n к этой поверхности, а для каждого вектора n получаются различные векторы напряжения. Таким образом, напряжение в точке – это совокупность всех векторов напряжений для всех ориентаций площадок, содержащих рассматриваемую точку.

Напряженное состояние тела будет известно, если задан способ построения вектора напряжений в любой точке тела для любой ориентации площадки. Если во всех точках тела для площадок одинаковой ориентации векторы напряжений одинаковы, то напряженное состояние будет однородным. Примерами однородных напряженных состояний являются растяжение – сжатие и чистый сдвиг.

Предположим, что на верхнюю и нижнюю грани ортогонального параллелепипеда действуют противоположно направленные силы, образующие пару сил. Пусть такую же пару сил образуют силы, приложенные к вертикальным граням параллелепипеда. Согласно правилу парности касательные напряжения на взаимно перпендикулярных гранях будут равны. При этом произойдет перекашивание исходного параллелепипеда. Это перекашивание, т.е. деформация формы параллелепипеда на определенный угол, и называется деформацией сдвига.

Если напряжения, возникающие в теле при действии внешних нагрузок, превысят предел упругости, то в теле после снятия нагрузки останется так называемая пластическая деформация, величина которой зависит от величины действующих сил, от условий нагружения тела и длительности пребывания его под нагрузкой.

Если нагрузить образец и оставить его под действием постоянного напряжения, то он со временем будет продолжать деформироваться, а к начальной деформации добавится дополнительная деформация. При снятии нагрузки первоначальная деформация исчезнет, но возникшая дополнительно останется. Оставшаяся деформация не является пластической, она со временем будет уменьшаться. Материалы, обладающие свойством последствия, называются вязкоупругими, а само последствие – это проявление запаздывающей упругости.

Инженерная реология – наука о деформации и течении различных тел, исследующая способы определения структурно-механических свойств сырья, полуфабрикатов и готовых продуктов с помощью соответствующего приборного оснащения с целью использования полученных результатов для совершенствования технологических процессов и повышения качества на всех стадиях производства готовой пищевой продукции. Различают феноменологическую реологию, макрореологию и микрореологию. Феноменологическая реология изучает однородные или квазиоднородные материалы в представлении их в виде сплошных сред. Макрореология изучает материалы в том виде, в каком они предстают перед наблюдателем при их внешнем осмотре. Микрореология рассматривает реологическое поведение многофазных систем в зависимости от реологических свойств компонентов.

Методами инженерной реологии на основе биохимических, биофизических, физико-химических и органолептических показателей проводят исследование процессов структурообразования продуктов, определяют нормативные показатели структурно-механических свойств продуктов для использования в технологической документации, получают необходимые данные для проектирования и расчета технологического оборудования.

При проведении реологических исследований свойства тел выражают в виде математических моделей, которые с тем или иным приближением характеризуют поведение реального тела в процессе его деформирования в условиях напряженного состояния и позволяют связать между собой напряжения, деформации и скорости деформации.

Протекание различных процессов: механических, тепловых, диффузионных, электрических и др. в значительной степени определяется структурно-механическими свойствами продуктов, которые зависят от их внутреннего

строения и состава, характера взаимодействия между собой частиц или молекул, физико-химического состояния влаги в материале и других факторов, определяющих тип структуры.

Таким образом, основное назначение инженерной реологии как науки состоит в определении свойств сырья и продуктов для использования данных об этих свойствах в качестве нормативов в технологической документации и в получении необходимых сведений для расчета конструктивно-технологических параметров технологического оборудования. Отсюда следует два основных направления:

- изучение реологических или в общем смысле структурно-механических свойств реальных тел;
- исследование условий движения масс в рабочих зонах машин и аппаратов.

При проведении реологических исследований свойства и поведение реальных тел выражают в виде математических или механических моделей, которые с теми или иными допущениями характеризуют параметры их изменения в процессе обработки. Пищевые продукты, большинство из которых относятся к сложным дисперсным системам, характеризуются определенными физико-химическими свойствами, среди которых важнейшее место занимают реологические свойства.

Реологические свойства подразделяются на базовые и технологические. Базовые реологические свойства определяют параметры реологических уравнений. Они делятся на две группы: фундаментальные и сложные (комплексные) свойства. Например, к фундаментальным свойствам относятся упругость, вязкость, пластичность, прочность и др. Сложные свойства, например динамическая пластичность, последействие, псевдовязкость и др., представляют собой комплекс фундаментальных свойств и используются при исследовании сложных моделей.

Для измерения технологических свойств разработаны специальные методы. Результатом оценки технологических свойств является некоторый коэффициент, выражающий соотношение свойств исследуемого продукта и свойств идеального тела. Например, к технологическим свойствам относятся пенетрация, адгезия и др.

Развитие реологии как составной части механики сплошных сред и как науки о течении и деформации тел способствовало созданию и применению новых методов анализа процессов переработки пищевых масс и способов получения продуктов с задаваемыми свойствами, а также новых подходов при проектировании технологического оборудования пищевых производств.

Прогнозирование поведения пищевых масс при их обработке в технологических потоках требует определения количественных характеристик реологических свойств, таких как, например, прочность, упругость, пластичность, вязкость, что целесообразно проводить на базе теории упругости, вязкоупругости, вязкопластичности и других теорий с применением известных реологических моделей или созданием новых их комбинаций.

К основным задачам реологии в пищевой промышленности относятся:

- определение реологических характеристик продуктов при различных значениях технологических факторов;

- создание средств технического оснащения для изучения деформирования реальных продуктов;
- разработка обоснованных методов расчёта технологических процессов и технических систем;
- управление структурными свойствами и качеством продукции.

Реологические свойства продукции характеризуют её поведение в условиях напряжённого состояния при воздействии внешней нагрузки, которая приводит к смещениям тел и деформациям массы в рабочих зонах машин. Это поведение зависит от формы и размеров тела, скорости деформации, структуры продукта, температуры, давления и других факторов.

В зависимости от действующих усилий и возникающих от них в обрабатываемых массах напряжений реологические свойства объединяются в три основные группы:

- сдвиговые свойства, характеризующие поведение продукта при действии касательных напряжений;
- компрессионные свойства, характеризующие поведение продукта при действии усилий сжатия;
- поверхностные свойства, возникающие на гранях раздела сред при воздействии нормальных и касательных напряжений.

Для выявления сдвиговых характеристик и определения типа реологической модели проводят анализ зависимостей величины касательных напряжений от скоростей сдвига (кривых течения).

Определение упругопластических показателей, закономерностей изменения плотности от давления, характеристик ползучести и релаксации напряжений составляет предмет исследований при изучении компрессионных свойств.

Оценки адгезионных и фрикционных характеристик продуктов, зависимостей адгезионного давления от величины напряжения, скорости отрыва получают при изучении поверхностных свойств. Фрикционные показатели оценивают по статическим и динамическим коэффициентам трения.

Создание автоматизированных производств предполагает, прежде всего, стабильность используемого сырья и полуфабрикатов по физическим и химическим свойствам. Известно, что пищевые продукты даже одного вида не обладают стабильными качественными показателями, что требует при обработке получения оперативной информации об изменении их качественных характеристик и применения средств автоматического регулирования процессов.

Исследование реологических свойств пищевой продукции является необходимым условием не только при оптимизации и интенсификации технологических процессов, создании эффективных методов и средств контроля параметров сырья и готовой продукции, но и условием для создания рациональных конструкций исполнительных и рабочих органов.

Эти свойства необходимо знать при проектировании технологического оборудования, например при проектировании многовалковой тестораскатывающей машины, осуществляющей деформацию куска теста в тонкий пласт заданной толщины и другого оборудования, рабочие органы

которого оказывают силовое воздействие на обрабатываемый материал. Исследование реологического поведения и свойств масс может осуществляться феноменологическим методом и методами моделирования.

Вопросы для контроля

1. Каково определение реологии? Что составляет ее объект и предмет?
2. Каковы основные задачи реологии в пищевой промышленности?
3. От каких факторов зависит реологическое поведение пищевых масс?
4. Что понимается под напряжением и деформацией тела?
5. Какими причинами вызываются внутренние напряжения в массах?
6. На какие группы делятся реологические свойства пищевых масс в зависимости от действия нагрузок и возникающих напряжений?
7. Что понимается под тензором напряжений?
8. Какие компоненты тензора относятся к нормальным напряжениям, а какие – к касательным?
9. Что такое главные напряжения?
10. Что понимается под инвариантами тензора и какова их роль?
11. Какие величины характеризуют тензор деформаций?
12. Какие физические явления описывает тензор скорости деформации?
13. Что понимается под тензором упругости?
14. Каким тензором может быть описана кинематика относительного перемещения точек сплошной среды?

Тема 2. Реологические свойства пищевых продуктов

Ключевые вопросы темы

1. Основные виды дисперсных систем.
2. Базовые физико-механические свойства масс.
3. Принципы реологической классификации пищевых продуктов.

Ключевые понятия: суспензия, эмульсия, пена, аэрозоль, пористая система, дисперсная фаза.

Литература: [14, с. 58–77]

Методические рекомендации

Характер поведения различных пищевых масс при обработке в рабочих зонах машин и аппаратов во многом определяется особенностями их структурного строения. Большинство пищевых продуктов представляют собой неоднородные дисперсные системы, состоящие из двух частей: сплошной, называемой дисперсионной средой, и входящей в неё в качестве содержимого – дисперсной фазой.

Одной из характеристик дисперсных систем является наименьший размер частиц дисперсной фазы a . Степень раздроблённости или дисперсности определяется как $D = 1/a$. Кроме дисперсности, частицы могут быть также охарактеризованы величиной удельной поверхности $S_{уд}$, которая равна отношению величины межфазной поверхности к объёму, занимаемому частицами, $S_{уд} = S/V$. Нетрудно убедиться, что с уменьшением размеров a увеличивается степень дисперсности D и удельная поверхность $S_{уд}$.

В зависимости от степени дисперсности системы делят на грубодисперсные (частицы дисперсной фазы менее 10^{-3} см), микрогетерогенные (10^{-3} ... 10^{-5} см) и ультрамикрогетерогенные, или коллоидные (10^{-5} ... 10^{-7} см). В грубодисперсных системах вещество дисперсионной среды состоит из молекул размером 10^8 см, поэтому в таких системах имеется чётко выраженная граница раздела между дисперсной фазой и дисперсионной средой.

По агрегатному состоянию дисперсных систем различают:

- (Т-Т) – твёрдые гетерогенные системы с твердой дисперсной фазой и средой, например как шоколад;
- (Ж-Т) – капиллярные системы с жидкой дисперсной фазой и твердой дисперсионной средой (мармелад, овощи, фрукты);
- (Г-Т) – пористые системы, у которых газообразная дисперсная фаза и твердая дисперсионная среда (пастила, зефир);
- (Г-Ж) – суспензии, имеющие твёрдую дисперсную фазу и жидкую дисперсионную среду (различные виды паст);
- (Ж-Ж) – эмульсии, имеющие жидкие дисперсную фазу и среду (молочные продукты);
- (Г-Ж) – пены с газообразной дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой (газированные напитки);
- (Т-Г) – аэрозоли с твердой дисперсной фазой и газообразной дисперсионной средой (мучная пыль);
- (Ж-Г) – аэрозоли с жидкой дисперсной фазой и газообразной дисперсионной средой (туман).

Количественные оценки, получаемые при измерении реологических свойств различных пищевых масс, являются важной исходной информацией для анализа технологии обработки пищевого сырья. Кроме того, методы контроля качественных показателей готовой продукции также во многом определяются реологическими свойствами входящих ингредиентов.

Моделирование динамического поведения различных пищевых масс с учётом их реологических характеристик позволяет выбрать оптимальную технологию обработки и разработать рациональные конструкции при проектировании нового технологического оборудования.

К важным реологическим явлениям для пищевых технологий можно отнести:

- релаксационные явления и явления ползучести при деформировании различных пищевых масс;
- повышение или понижение вязкости в зависимости от скорости деформирования продукта;
- переход веществ из твердообразного в текучее состояние при механическом воздействии и обратное отверждение;
- эффект последействия при деформировании веществ;
- зависимость реологических свойств от электромагнитных полей;
- растяжимость высокомолекулярных белковых соединений при деформировании.

Свойства реальных пищевых масс отличаются большим разнообразием, что затрудняет их классификацию с реологических позиций, поскольку одни и

те же материалы могут быть отнесены к различным группам. Например, пасты и кремы могут рассматриваться как коллоидные системы или как многокомпонентные дисперсии. Реологические свойства у различных видов масел и жиров сильно зависят от тепловых воздействий и находятся в диапазоне от вязких жидкостей до вязкопластичной среды с определённым значением предела текучести. Например, многие растительные масла ведут себя как ньютоновы жидкости, а различные среды характеризуются отсутствием текучести при небольших сдвиговых напряжениях, что свидетельствует о наличии у них предела текучести.

Понятие течения относится к жидкостям, а деформации – к твёрдым массам. Материалы, обладающие свойствами одновременно жидких и твердых тел, считаются вязкоэластичными, или вязкопластичными.

Анализ реологических свойств пищевых продуктов показывает, что для них может быть характерно:

- упругое и вязкоупругое поведение;
- неньютоновские вязкостные свойства;
- тиксотропия;
- наличие предела текучести.

Многие пищевые продукты из-за низкой прочности связей начинают проявлять нелинейное поведение при небольших внешних нагрузках и деформациях. Различие свойств пищевых продуктов обусловлено большим разнообразием структур и химического состава.

В зависимости от структуры пищевые продукты делятся на твёрдые, полутвёрдые и жидкие.

Для твёрдых продуктов характерна кристаллическая (поваренная соль) или аморфная структура (карамельные изделия). Капиллярно-пористая коллоидная структура характерна для таких видов продуктов, как хлеб, крупа, макаронные изделия, печенье, ткани мяса, рыбы, плодов и овощей, капиллярно-пористую структуру имеет кусковый сахар. Мармелад, желатин – концентрированные студни.

Механические свойства твёрдых тел непосредственно связаны с их структурой, действующими в них молекулярными силами сцепления и особенностями хаотического теплового движения. Под структурой понимается пространственная сетка, характерная для твердообразных пищевых продуктов, образуемая сцеплением друг с другом атомов, ионов, молекул и коллоидных частиц. Такая структура определяет упругость и прочность продуктов. Она представляет собой правильную пространственную решётку в кристаллических телах или хаотический каркас в коагуляционных веществах, гелях, студнях и др.

Развитие молекулярной физики и коллоидной химии по структурообразованию в дисперсных системах показало, что различие между жидкостями и твёрдыми телами не является резким и носит кинематический (релаксационный) характер. Между предельными состояниями идеально упругого твёрдого тела и вязкими жидкостями имеется ряд переходов, обуславливающих многообразие реальных тел промежуточного характера. Так, например, сахар, карамель, жиры могут находиться в твёрдом и жидком состояниях в зависимости от температуры, при этом происходят переходы из

кристаллического состояния в вязкотекучее, пластичное или аморфное. Чем больше разрушение структуры, тем больше текучесть получаемого продукта.

Изучением неупругого поведения тел и течения структурированных жидкостей и твёрдых тел занимается физико-химическая механика и её раздел – реология, под которой понимают науку о деформациях и текучести масс.

При непрерывном увеличении деформации под действием конечных сил материал течёт. Различают вязкое и пластичное течения. Вязкое течение происходит под действием любых сил, скорость деформации уменьшается с уменьшением сил, а при снятии нагрузки обращается в ноль. Пластичное течение возникает в том случае, когда силы превышают некоторый предел, называемый пределом текучести (пределом напряжения сдвига).

Результатом измерения технологических свойств масс является некоторый коэффициент, выражающий сравнение данной массы со свойствами идеального тела. Примерами полужидких продуктов являются пюре, фарш, стужённое молоко и др. Жидкие продукты (мёд, молоко, растительное масло, вино, пиво, соки, напитки и др.) представляют собой коллоидные растворы или эмульсии, суспензии, полярные и неполярные растворы. Свойства пищевых продуктов зависят также от температуры, давления, технологии обработки и других факторов.

Важным свойством дисперсных систем является их способность к структурообразованию. Свободно дисперсные системы характерны для малоконцентрированных растворов, где частицы удалены друг от друга, что не даёт возможности для их взаимодействия. Дисперсные системы, в которых частицы связаны между собой и не способны к перемещению, называются связнодисперсными системами. В таких системах частицы дисперсной фазы образуют пространственную сетку, или структуру.

Структурно-кинетическое течение проявляется особенно ярко при скачкообразном изменении скорости сдвига. Если при повышении скорости сдвига наступает замедленное по времени уменьшение эффективной вязкости, то речь идёт о тиксотропном поведении дисперсной системы. Дисперсные системы такого вида называются тиксотропными. Тиксотропия считается обратимой, если после прекращения сдвигового напряжения постепенно устанавливается начальное значение эффективной вязкости. Если начальное значение эффективной вязкости не достигается после прекращения сдвигового нагружения, то речь идёт о необратимой тиксотропии.

По характеру поведения и свойствам различают идеальные, реальные и реологические жидкости. При движении реальных жидкостей имеют место силы внутреннего трения в потоке жидкости, т.е. при постоянном напряжении сдвига наблюдается деформация с постоянной скоростью (течение). Жидкость, у которой коэффициент вязкости есть величина постоянная, называется ньютоновой жидкостью. Реологическое уравнение ньютоновой модели сред связывает напряжение со скоростью деформации, т.е. скорость деформации пропорциональна напряжению сдвига.

Реальные продукты имеют отклонение от ньютоновского поведения, и модель в этом случае не является линейной. Эффективная вязкость неньютоновских жидкостей состоит из двух составляющих: ньютоновской

вязкости, обусловленной внутренним течением жидкости и представляющей физическую константу массы и структурного сопротивления, являющегося функцией скорости сдвига. Таким образом, эффективная вязкость является реологической характеристикой, учитывающей внутреннее трение и структурно-динамическую компоненту.

Существует классификация определения состояний тел от твёрдого до истинно вязкого по модулю упругости, вязкости и другим показателям или по характеру кривой эффективной вязкости $\rho_{эф}$ и периоду релаксации.

Жидкообразные продукты не имеют предельного напряжения сдвига, их течение начинается при сколь угодно малых напряжениях сдвига. Эти продукты, за исключением вязких жидкостей, имеют слабую структурную сетку и обладают аномалией течения. В зависимости от механического воздействия, влажности, температуры, концентрации сухих веществ один и тот же продукт может переходить из одной группы тел в другие. Реологические свойства жидкообразных продуктов должны учитываться при определении конструктивно-технологических параметров машин, поскольку они позволяют глубже оценить процессы переработки сырья и показатели качества получаемой продукции.

К основным физико-механическим свойствам пищевых продуктов относятся форма, геометрические размеры, масса, плотность (объёмная или насыпная) и др.

Форма плодов и овощей – показатель ботанического вида и сорта. Форма хлебобулочных и кондитерских изделий, сычужных сыров характеризует качество сырья и правильность проведения технологического процесса. Для сычужных сыров, колбасных изделий, макарон, яблок, овощей и других продуктов нормируется размер. Например, рыбу по размеру делят на крупную, среднюю, мелкую и т.д.

В партии картофеля ограничивается массовая доля мелких клубней, а для моркови и столовой свёклы не допускаются крупные корнеплоды.

Масса единицы продукции устанавливается при оценке качества многих пищевых продуктов. Масса в килограммах устанавливается при определении размера некоторых рыб, при заготовке и реализации свежей капусты (масса кочана) и т.п. Для злаковых зёрен и необжаренного кофе показателем качества является масса 1000 зёрен, для орехов – 100 шт., для карамели и конфет регламентируется количество единиц в 1 кг.

Плотность продукта равна отношению массы к единице его объёма, измеряемая в $\text{кг}/\text{м}^3$. В жидких продуктах определяют относительную плотность – безразмерную величину, которую находят делением массы продукта (при 20 °С) на массу равного объёма дистиллированной воды при той же температуре. По плотности определяют, например, массовую долю сахара в винограде, содержание поваренной соли в рассолах квашеной капусты и солёных огурцов, крепость спиртных напитков, содержание крахмала в клубнях картофеля (чем больше плотность клубней картофеля, тем больше в них крахмала).

С помощью плотности можно оценить состав жиров в молоке. Например, плотность коровьего молока (1,027...1,031 $\text{кг}/\text{м}^3$) обусловлена массовой долей

жира, белков, углеводов и минеральных веществ, поэтому при разбавлении водой плотность молока уменьшается.

Объёмную или насыпную массу продукта определяют отношением его массы к занимаемому объёму вместе с пустотами и порами. Объёмную массу продукта необходимо учитывать при определении ёмкости тары, складских помещений, размещении продуктов для хранения, при выборе транспортных средств при перевозках. Например, объёмная масса картофеля составляет 650...700 кг/м³, капусты – 350...500, свёклы – 600, лука репчатого – 550...600, зёрна пшеницы – 760 кг/м³.

Структурно-механические свойства пищевых продуктов. Эти свойства характеризуют сопротивляемость пищевых продуктов механическому воздействию. Они зависят не только от химического состава, но и от строения (структуры) продукта.

Механические свойства продуктов проявляются в процессе обработки пищевых масс, когда изменяется форма и размер тел под действием внешних сил. При определении реологических свойств продуктов измеряют количество механической энергии, расходуемой в течение времени обработки на создание в продуктах обратимых (упругих) или остаточных (пластических) деформаций, которые характеризуют силы химических связей между молекулами и элементами структуры массы. Эти данные позволяют судить о скорости протекающих в продуктах химических и биохимических процессов.

Реологические, или структурно-механические свойства характеризуют поведение продукта в условиях напряжённого состояния и позволяют связать между собой напряжения, деформации и скорости деформации в момент приложения усилий. В зависимости от вида прикладываемых усилий эти свойства могут быть условно разделены на три группы: сдвиговые, объёмные и поверхностные.

Сдвиговые свойства характеризуют поведение продукта при воздействии на него касательных напряжений.

Объёмные свойства определяют поведение продукта при воздействии на него нормальных напряжений.

Поверхностные свойства характеризуют поведение поверхностного слоя продукта на границе раздела с другим материалом при воздействии нормальных (адгезия) и касательных (внешнее трение) напряжений.

К показателям структурно-механических свойств пищевых продуктов относят прочность, твёрдость, упругость, пластичность, вязкость и др.

Прочность продукта характеризует его способность сопротивления механическому разрушению. Данный показатель используется, например, при определении качества макарон, сахара-рафинада, сухарей и других твёрдых и хрупких продуктов.

Твёрдость продукта зависит от поверхностного сопротивления тела проникновению в него другого более твёрдого предмета. Для определения твёрдости на поверхность продукта воздействуют твёрдым наконечником, имеющим форму шарика, конуса, пирамиды или иглы, а о величине твёрдости судят по величине отпечатка (глубине проникновения и площади), оставляемого измерительным наконечником на поверхности тела.

Упругость характеризует способность массы мгновенно восстанавливать свою форму после снятия приложенной внешней нагрузки, а эластичность - способность восстановления формы через некоторое время. Эти показатели имеют большое значение при определении сроков хранения и условий транспортирования продуктов, а также при определении их некоторых качественных показателей, например мякиша хлеба, клейковины муки, свежести мяса и рыбы и др.

Пластичность – это свойство продукта, характеризующееся получением необратимых деформаций при определённой величине нагрузки. Ползучестью, например, обладают карамельная масса, тестовые полуфабрикаты и другие продукты. Явление ползучести пластичных масс проявляется в постепенном нарастании деформации без увеличения нагрузки, что характерно для коровьего масла, маргарина, сычужных сыров, мороженого, мармелада, повидла, и других кондитерских изделий.

Релаксация – это свойство продуктов твёрдо-жидкой структуры, характеризующее время перехода упругих деформации в пластические при постоянной нагрузке. Определённой величиной релаксации обладают, например, сыр, творог, мышечная ткань, мясной фарш.

Поскольку многие пищевые продукты являются многокомпонентными, то каждому из компонентов присуще своё значение времени релаксации. То есть функциональным продуктам свойственна как упругая деформация, которая исчезает после снятия нагрузки, так и запаздывающая упругая деформация, для исчезновения которой требуется некоторое время, а также пластическая деформация. Полная деформация материального тела будет представлять суперпозицию этих деформаций.

Вязкость характеризует внутреннее трение, возникающее при относительном движении слоев жидких продуктов, таких как сиропы, патока, мёд, майонез, соки, растительные масла и другие жидкости.

Адгезия (липкость) – это способность продуктов проявлять в различной степени силы взаимодействия (связи) с другим продуктом или с поверхностью тары, в которой находится данный продукт. Свойствами липкости обладают многие пищевые продукты: сливочное масло, сыр, мясной фарш, варёные колбасы, ирис и пр., что нужно учитывать при конструировании рабочих органов машин и назначении технологических режимов обработки. Если отрыв продукта от рабочего органа происходит на границе контакта, то такой отрыв называют адгезионным, если по слою продукта – когезионным, а также смешанным, или адгезионно-когезионным.

Для характеристики структурно-механических свойств пищевых продуктов применяют термин «консистенция». Под консистенцией в данном случае понимают комплексный показатель органолептической оценки продукта, характеризующий совокупностью свойств, таких как вязкость продукта, его липкость, эластичность и пр.

Вопросы для контроля

1. Что понимается под дисперсной системой пищевых продуктов?

2. На какие группы по степени дисперсности делятся неоднородные дисперсные системы?
3. На какие классы по агрегатному состоянию делятся дисперсные системы?
4. Что представляют собой суспензии и эмульсии? Какие пищевые продукты являются их типичными представителями?
5. Какие свойства присущи эмульсиям с позиций реологии?
6. Что понимается под тиксотропией? Какие свойства проявляют тиксотропные продукты?
7. Какие реологические явления характерны для пищевых технологий?
8. Какие реологические свойства характерны для пищевых продуктов?
9. Как классифицируются твердые тела по реологическому поведению?
10. Какие тела относятся к вязкоупругим?
11. Что понимается под абсолютно твердым телом?
12. Что понимается под упругостью и упругим телом?
13. Для каких тел характерны обратимые деформации?
14. Какие константы достаточны для описания напряженного состояния линейных упругих масс?
15. Какова характерная кривая нормального напряжения от деформации для упругих тел?

Тема 3. Моделирование реологического поведения пищевых масс

Ключевые вопросы темы

1. Основные реологические модели и их механические аналоги.
2. Построение и анализ двухэлементных моделей.
3. Построение и анализ трехэлементных моделей.
4. Построение и анализ четырехэлементных моделей.
5. Принцип суперпозиции напряжений и деформаций.

Ключевые понятия: модель Сен-Венана, модель Ньютона, модель Фойгта, модель Максвелла, модель Бюргерса, модель Кельвина-Фойгта.

Литература: [10, с. 28–46]

Методические рекомендации

Поведение реальных пищевых масс при их деформировании в процессе преобразования сырья в готовую продукцию обуславливается влиянием большого количества контролируемых и неконтролируемых факторов, учёт степени влияния которых представляет значительные трудности. Поэтому при реологических исследованиях представляют продукты в виде элементарных моделей сплошных сред с характерными преобладающими свойствами – упругости, вязкоупругости, пластичности, ньютоновых и неньютоновых жидкостей и др.

К основным простым реологическим моделям в механике сплошных сред относятся:

- твёрдое тело Гука с линейной связью между напряжением и деформацией;

- пластическое тело Сен-Венана, которое до определённого предела ведёт себя как упругое тело Гука, а после этого предела проявляет пластическое течение;

- ньютонова жидкость.

Тела, обладающие набором свойств, например упругопластичностью, вязкоупругостью и др., рассматриваются как комбинации этих моделей.

Аналогом простых реологических моделей могут выступать элементарные механические модели, использование которых для исследования реологических свойств реальных продуктов обеспечивает наглядность и лучшее понимание реологического поведения реальной массы.

Используя элементарные механические модели, можно оценить по отдельности упругие, вязкие и пластичные свойства реальных тел, а объединяя элементарные модели в единую систему, изучить более сложные комплексы этих свойств.

Так, упругие свойства твёрдых тел наглядно и просто представляются упругой пружиной растяжения или сжатия. Если закрепить один конец пружины растяжения, а к другому концу приложить растягивающую силу F , то перемещение этого конца будет пропорционально приложенной силе пружины, т.е. $x = F/c$, где x – величина смещения подвижного конца пружины; c – жёсткость пружины.

Сравнивая это выражение с выражением закона Гука, нетрудно заметить, что x – это аналог деформации, F – аналог напряжения, c – аналог модуля упругости при сдвиге G .

Реологическая модель идеально пластичного тела Сен-Венана характеризуется тем, что деформация начинается только тогда, когда напряжение сдвига x превысит предел текучести массы a_m , после чего деформация может происходить с любой скоростью.

Её механический аналог представляет собой две прижатые друг к другу параллельные пластинки, на которые действуют растягивающие силы F . Перемещение пластинок относительно друг друга начнётся в том случае, если сила F превысит силу трения между пластинками, равную силе нормального давления, умноженной на коэффициент трения. Здесь сила F является аналогом напряжения сдвига x , а сила трения – аналогом предела текучести a_T .

В реальных пищевых массах под действием приложенных нагрузок могут наблюдаться не только упругие мгновенные, но и запаздывающие упругие и остаточные деформации.

Такое реологическое поведение проявляется у многих пищевых продуктов, например у теста, мясного фарша, карамельной массы, творога и др. Для описания реологических свойств этих масс требуется построение более сложных моделей.

Для точного определения реологических характеристик реальных продуктов нужно построить несколько кривых ползучести при различных значениях напряжения, что даст возможность установить зависимость мгновенной, или запаздывающей упругой деформации и скорости деформации вязкого течения от напряжения сдвига, а также определить графически характеристики массы по результатам серии опытов.

При проектировании технологического оборудования необходимо знание свойств и реологического поведения масс в условиях каждой операции технологического процесса. Например, при формовании тестовых заготовок печенья на роторной машине остаточные деформации в тесте должны превышать упругие деформации, что позволит сохранить рисунок оттиска на поверхности тестовой заготовки вплоть до выпечки.

Присоединяя к модели Фойгта ещё один упругий элемент, можно учесть при ползучести мгновенную деформацию. Данная модель называется стандартным вязкоупругим телом, или моделью Кельвина-Фойгта.

Вопросы для контроля

1. Какие тела в механике сплошных сред могут быть представлены в виде простых реологических моделей?
2. Какие тела представляют комбинации простых реологических моделей?
3. Какие механические модели могут являться аналогами при описании реологических свойств реальных продуктов?
4. С помощью какого механического элемента могут быть представлены упругие свойства реальных тел?
5. Какие параметры механических упругих элементов моделируют реологические свойства реальных продуктов?
6. Что является механическим аналогом среды, подчиняющейся закону Ньютона?
7. Что является механическим аналогом идеального пластического тела?
8. Какими параметрами механической модели представляются реологические свойства пластического тела?
9. Что понимается под моделью Максвелла? Реологические свойства каких продуктов она моделирует?
10. Что понимается под моделью Фойгта? Реологические свойства каких тел она моделирует?
11. Каким образом и с какой целью осуществляется построение комбинированных механических моделей?
12. Каков механизм явлений, происходящих при деформировании механической модели Фойгта, позволяющих описать реологическое поведение вязкоупругого тела?
13. Какая механическая модель называется стандартным вязкоупругим телом, или моделью Кельвина-Фойгта?
14. Какой механической моделью учитывается время релаксации и время запаздывания в вязкоупругом материале?
15. Из каких элементов состоит модель Бюргерса? Каков её принцип действия?
16. В чём состоит сущность принципа суперпозиции напряжений и деформаций?

Тема 4. Методы и средства измерения реологических свойств пищевых масс

Ключевые вопросы темы

1. Классификация и характеристика методов измерения реологических свойств пищевых продуктов.
2. Вискозиметрия и способы измерения вязкости.
3. Роль адгезии и трения в процессах пищевых производств.
4. Приборы для измерения величины адгезии и силы трения.

Ключевые понятия: реометрия, вискозиметрия, адгезия, сухое трение, адгезиометр, пенетрация.

Литература: [9, с. 11–39]

Методические рекомендации

Измерения реологических свойств пищевых масс, которыми занимается реометрия, имеют целью определение численных значений этих свойств, установление их интервала изменения в зависимости от условий проведения эксперимента и соотнесение экспериментальных данных с полученными данными по реологическим уравнениям состояния тех или иных масс.

Главной целью реометрии является получение достоверных численных значений структурно-механических свойств масс, являющихся исходной базой для выбора рациональной технологии переработки пищевого сырья и создания более совершенных рабочих органов технологического оборудования.

В экспериментальных исследованиях используются два метода измерения реологических свойств – абсолютный и относительный.

Абсолютный метод основан на прямом измерении тех или иных параметров определяющих уравнений. Например, при абсолютном методе измерения вязкости ньютоновой жидкости, описываемой уравнением $\tau = \mu \dot{\gamma}$, с помощью соответствующих измерительных средств оцениваются скорость сдвига и напряжения, а вязкость определяется их отношением. Напряжения в зависимости от конструктивных особенностей измерительного прибора, влияющих на параметры течения жидкости, однозначно зависят от крутящего момента, а скорость течения жидкости определяет скорость деформации.

Относительный метод является сравнительным, он основан на сопоставлении исследуемого массы с эталонным образцом.

При измерении вязкости жидких продуктов в зависимости от геометрии течения абсолютные и относительные методы измерения делятся на три группы:

- течение между поверхностями или через отверстие;
- обтекание тела;
- свободное течение потока.

Виды течения между поверхностями:

- течение через капилляр;
- ротационное течение между подвижной и неподвижной поверхностями различной формы;
- сдвиг жидкости между параллельными плоскостями, одна из которых неподвижна;
- сжатие слоя двумя параллельными поверхностями;

- течение от внедрения в жидкий материал твёрдого тела - индентора различной формы.

Измерения при обтекании тела жидкостью могут проводиться в свободном или ограниченном стенками потоке. Форма обтекаемого тела преимущественно сферическая или коническая.

Измерения реологических свойств пищевых масс могут проводиться при постоянной скорости течения или при постоянной нагрузке. Современные измерительные средства позволяют изменять эти параметры в широких пределах и поддерживать их с высокой точностью. При этом величина деформации может изменяться по амплитуде и частоте, а её скорость – во времени и в зависимости от температуры.

Измерения вязкоупругих свойств пищевых масс проводятся следующими способами:

- измеряют деформацию при постоянном напряжении – испытания на ползучесть массы (задают ряд величин напряжений);
- измеряют напряжения при постоянной деформации – испытания на релаксацию массы (задают различные деформации);
- проводят измерения при периодических деформациях с постоянной частотой колебаний напряжений или деформаций массы с определением характера и величины его реакции.

Вискозиметрия и способы измерения вязкости

Из всего набора реологических свойств пищевых масс двум свойствам принадлежит основная роль – эффективной вязкости и линейному изменению вязкоупругих параметров.

Измерение вязкости различных пищевых масс составляет объект исследования вискозиметрии.

Капиллярная вискозиметрия. Сущность метода капиллярной вискозиметрии состоит в оценке сопротивления калиброванного канала капилляра течению в нём исследуемой жидкости. Под капилляром понимают трубку с отверстием круглого сечения и большим отношением длины к диаметру. Кроме круглого сечения, могут использоваться каналы разной формы.

При капиллярной вискозиметрии устанавливается зависимость между объёмным расходом жидкости Q , проходящей через канал, и перепадом давления на концах капилляра Δp . На практике один из этих параметров задаётся, а второй измеряется.

При измерении вязкости ньютоновых жидкостей с помощью капиллярных вискозиметров принимают следующие допущения:

- напряжение сдвига пропорционально скорости деформации;
- режим течения ламинарный;
- течение жидкости в капилляре стационарно с постоянным профилем скоростей;
- скорость потока у стенки капилляра равна нулю;
- тепловыделения при течении жидкости в капилляре пренебрежимо малы, а теплота отводится стенкой капилляра;
- отношение длины капилляра к радиусу поперечного сечения $L / R \gg 1$.

Капиллярные вискозиметры используются для определения вязкости жидких масс с небольшой её величиной (бульоны, жидкие молочные продукты, растительные масла, соки и др.).

Взаимодействие поверхностей имеет молекулярно-механическую природу. Молекулярное взаимодействие обусловлено взаимным притяжением твёрдых тел – их адгезией, а механическое – взаимным внедрением элементов контактирующих поверхностей.

По И. В. Крагельскому, в зависимости от величины адгезии и глубины внедрения возможны пять основных видов нарушения фрикционных связей между твёрдыми телами:

- упругое оттеснение массы (упругая деформация внедрившихся выступов), наблюдаемое при небольших нагрузках, когда контактное напряжение меньше предела текучести массы;
- пластическое оттеснение массы (пластическая деформация микровыступов неровностей), наблюдаемое при превышении предельного значения контурного давления и повышении температуры контакта;
- срезание выступов внедрившегося массы при нарушении пластического течения при больших контурных давлениях;
- схватывание плёнок, присутствующих на контактирующих поверхностях тел (поверхностное разрушение слабой адгезионной связи);
- схватывание поверхностей вследствие глубинного вырывания массы.

Первые три вида наблюдаются при механическом воздействии, последние два – при молекулярном.

Адгезия – это взаимодействие (прилипание) различных по структуре масс при их взаимном контакте. Адгезия возникает в результате сил межмолекулярного сцепления на контактной поверхности тел или за счёт проникновения инородной массы (адгезива) в поры субстрата.

Прочность адгезионных связей обуславливается реологическими свойствами тел, состоянием поверхности рабочих и исполнительных органов технологического оборудования, длительностью контакта, наличием промежуточного вещества между адгезивом и субстратом, а также другими факторами.

Характеристикой адгезии является сила отрыва одной поверхности от другой, отнесённая к площади контакта, или величина затраченной работы на отрыв, или время на разрушение связи между адгезивом и субстратом.

Адгезиометры – это приборы для определения адгезионных характеристик. Классификация этих приборов осуществляется по способу приложения нагрузок. По данному признаку адгезиометры делятся на приборы с постепенным отрывом, приборы с мгновенным отрывом и сдвигомеры.

Нагрузка отрыва прикладывается нормально к поверхности субстрата, и величина адгезии будет определяться отношением нормальной силы к площади контакта.

В сдвигомерах определяются касательные напряжения, возникающие при смещении адгезива относительно поверхности субстрата.

Приборы и методы измерения адгезии основаны на разрушении адгезионного соединения путём приложения внешнего усилия. По способу

приложения усилия различают методы равномерного и неравномерного отрыва, а также сдвига.

На величину адгезии, кроме технологических свойств самого продукта (температура, влажность, состав и т.д.) и марки конструкционной массы, влияют условия измерения, а также геометрические, кинематические и динамические параметры прибора. Поэтому к адгезиометрам предъявляются следующие требования:

показания приборов не должны нуждаться в предварительной тарировке на каком-либо эталонном материале и должны выражаться в абсолютной системе единиц;

- перед измерением продукт должен быть плотно прижат к субстрату для обеспечения надёжного контакта и удаления воздушных пузырьков;

- измерения, проведённые на пластинах субстрата при разной толщине и площади слоя, дают при прочих равных условиях разные числовые значения адгезионных характеристик, поэтому при измерениях должен использоваться шаблон для нанесения на пластину продукта заданной толщины;

- различие в марках массы пластин и степени их шероховатости поверхности влияют на прочность молекулярных контактов, поэтому пластины должны быть изготовлены из одинаковой массы с одинаковой чистотой поверхности;

- измерительный прибор должен допускать варьирование скорости приложения силы отрыва или сдвига.

Приборы для определения адгезионных характеристик по способу приложения нагрузки делят на адгезиометры с постепенным отрывом, адгезиометры с мгновенным отрывом, а также сдвигометры. При равномерном отрыве нагрузка прикладывается перпендикулярно плоскости субстрата, при этом адгезия характеризуется нормальной силой, отнесённой к единице площади контакта, т.е. нормальным напряжением. При сдвиге определяются касательные напряжения, возникающие при относительном смещении слоев адгезива относительно субстрата. Для исследования адгезии пищевых вязкопластичных масс используются в основном приборы, основанные на способе нормального отрыва. На таких приборах были определены адгезионные характеристики мясных полуфабрикатов, теста, муки, кондитерских масс и многих других пищевых продуктов.

Приборы, применяемые в инженерной реологии, используются для определения структурно-механических свойств различных видов сырья, полуфабрикатов и готовых продуктов.

По состоянию измеряемого объекта – твёрдое или жидкообразное – приборы делятся на два вида, а в зависимости от используемого принципа измерения – на три группы: приборы, измеряющие абсолютные показатели, относительные и условные. С помощью приборов первой группы получают абсолютные численные значения свойств продуктов. Приборы второй группы требуют предварительной тарировки на эталонном материале, а результатом измерения служат безразмерные относительные показатели. Значения измеряемых величин, полученные на приборах третьей группы, используют для сравнения качественных показателей продуктов.

По способу измерений приборы могут быть дифференциальными и интеграционными. Первые позволяют проанализировать, например, распределение скоростей и деформаций продукта в приборе для любого момента времени. Вторые дают возможность определить суммарный эффект измерения.

При работе на приборах возможно появление систематических и случайных ошибок. При измерении структурно-механических свойств пластичных и вязких масс удовлетворительной считается ошибка ± 10 и ± 2 % – при измерении свойств жидких продуктов. Снижение величины случайных ошибок достигается рандомизацией измерений и отработкой методики экспериментов.

Реогониометры и эластовискозиметры. С помощью данных приборов можно осуществлять измерения вязкости различных жидкостей в широких пределах изменения скорости сдвига, напряжений, температуры и других факторов.

Современные конструкции эластовискозиметров моделей RDA и RDS выпускаются фирмой Rheometrics Scientific (США). Эти приборы позволяют проводить измерения при стационарном течении и периодических колебаниях, в том числе при линейном и нелинейном поведении исследуемых масс с изменяемой частотой вращения в диапазоне $1:10^5$, например при замерах напряжений сдвига фруктовой пульпы в зависимости от скорости её деформации и температуры.

Реометр модели SR5 данной фирмы используется при определении релаксации, ползучести и периодических колебаниях. Прибор позволяет задавать скорость деформации или величину напряжения в диапазоне температур от минус 40 до 350 °С.

Пенетрометры. При анализе текстуры фруктов и овощей, а также сливочного масла, маргарина, твёрдых жиров, теста и мясных продуктов измеряют силу проникновения в продукт на определённую глубину. Измерение проводится с помощью измерителей давления, называемых пенетрометрами.

Пенетрация – это один из методов исследования некоторых текстурных свойств полутвёрдых и твёрдых пищевых продуктов путём определения их сопротивления проникновению в них индентора определённых размеров и массы, выполненного в виде конуса, сферы или цилиндра. Измерения проводятся или при постоянной глубине проникновения (определяется усилие), или при постоянном усилии (определяется глубина проникновения).

Полуавтоматический пенетрометр модели ППМ-4 по ГОСТ Р 50 814-95 состоит из трёх основных механизмов: измерительного, регистрирующего и тормозного. Прибор работает следующим образом: исследуемый продукт укладывают плотно, без пустот в ёмкость, изготовленную из электропроводящего массы, которая устанавливается на электроконтактную пластинку основания прибора. При нажатии на пусковую кнопку подаётся питание на электромагнит, который поворачивает рычаг, стопорящий шток, обеспечивающий свободное опускание конуса. При соприкосновении вершины конуса с продуктом замыкается электрическая цепь и через электронно-механическую систему величина перемещения конуса отмечается на шкале прибора.

Пенетрация по методу, указанному в ГОСТ 5346-78, определяется по глубине погружения в испытуемую среду стандартного конуса и выражается в градусах, фиксируемых стрелкой на шкале циферблата пенетрометра. Число градусов, показываемое стрелкой, соответствует числу десятых долей миллиметра глубины погружения конуса.

Вопросы для контроля

1. Что является главной целью реометрии?
2. На какие группы делятся методы измерения вязкости жидких продуктов?
3. Что относится к объектам исследований вискозиметрии?
4. В чём заключается сущность капиллярной вискозиметрии?
5. Какие допущения принимаются при измерении вязкости ньютоновых жидкостей с помощью капиллярных вискозиметров?
6. От каких параметров зависит объёмный расход жидкости через капилляр в капиллярном вискозиметре?
7. От каких параметров зависит скорость сдвига жидкости по сечению капилляра?
8. По каким признакам проводится классификация капиллярных вискозиметров?
9. Каково устройство и принцип действия капиллярных вискозиметров Оствальда и Уббелоде?
10. Каково устройство вискозиметра с падающим шариком? Для каких целей используются данные вискозиметры?
11. В чём заключается сущность ротационной вискозиметрии?
12. Чему равен момент сил, действующих на цилиндрическую поверхность вращающегося внутреннего цилиндра ротационного вискозиметра?
13. Каково устройство ротационного вискозиметра с конической поверхностью?
14. Для каких пищевых продуктов используются конусно-плоскостные вискозиметры?
15. Какие факторы ограничивают широкое применение ротационных вискозиметров?

Тема 5. Особенности строения частиц сыпучих масс и их свойства

Ключевые вопросы темы

1. Особенности строения частиц сыпучих масс.
2. Основные свойства сыпучих масс в статическом и динамическом состоянии.
3. Анализ движения частиц сыпучих масс.

Ключевые понятия: мука, крупа, комбикорм, премикс, белково-витаминная добавка, скорость витания.

Литература: [11, с. 60–84]

Методические рекомендации:

Продукт, образованный множеством сыпучих твёрдых частиц, можно представить в виде сложной системы, изменяющей свои свойства в зависимости от плотности расположения частиц, характера внешнего воздействия и внешних условий. Для описания состояний сыпучих продуктов необходим учёт ряда характеристик. К таким характеристикам относятся:

- гранулометрический состав – количественное распределение составляющих продукт частиц по линейным размерам;
- физическая плотность – плотность вещества, из которого состоят частицы сыпучего продукта;
- насыпная плотность – масса продукта, содержащаяся в единице занимаемого им объёма;
- индекс, характеризующий способность сыпучего продукта к вибрационному уплотнению, равный отношению плотности продукта после вибрационного уплотнения к насыпной плотности этого продукта;
- компрессионный показатель, характеризующий изменение насыпной плотности продукта под действием сжимающего усилия;
- твёрдость частиц;
- когезия;
- адгезия;
- абсолютная влажность;
- относительная влажность;
- гигроскопичность;
- индекс свободного течения, характеризуемый наименьшим отверстием ёмкости, через которое продукт способен вытекать под действием гравитационной силы без дополнительного принуждения. При диаметре отверстия меньше определённого критического значения продукт образует устойчивый свод;
- угол естественного откоса;
- угол динамического откоса. Данный угол образуется при истечении сыпучего продукта через отверстие в плоском горизонтальном днище, когда в нижней части ёмкости образуется зона ускоренного движения частиц, отделяемая от зоны малоподвижного продукта линией динамического откоса.

Типичным представителем сыпучих продуктов являются зерновые культуры, которые являются основным сырьём для производства муки, круп и комбикормов, также относящихся к сыпучим массам.

Преобразование исходного сырья в конечную продукцию в зависимости от её назначения осуществляется в различных технологических системах.

Эффективность любого производственного процесса зависит главным образом от трёх основных факторов: качества сырья, совершенства технологии и конструкции машин.

Физико-механические свойства зерна. Механические свойства сыпучих масс оцениваются рядом показателей. К таким показателям, оказывающим существенное влияние на технологию обработки, относятся, например, геометрические параметры частиц, их плотность, состояние поверхности,

гигроскопичность, сыпучесть, слёживаемость, способность к сводообразованию и пр.

Влияние геометрических характеристик зерна на технологические процессы его преобразования в полуфабрикаты и готовую продукцию проявляется в следующем:

- форма и линейные размеры зёрен оказывают большое влияние на процессы тепломассопереноса при термической обработке зерна;
- эффективность смешивания и гранулирования непосредственно зависят от формы (показателя округлости) и линейных размеров зерновых частиц;
- чем крупнее зерно, тем больше выход муки и крупы;
- чем больше выравненность зерна по крупности, тем выше процент выхода годной продукции и стабильность процессов обработки.

Стекловидность зерна влияет на выход крупок. Чем выше стекловидность, тем больше выход крупки при дроблении и меньше муки. По стекловидности пшеница делится на три группы: низкостекловидная – менее 40 %, среднестекловидная – 40–60 % и высокостекловидная – более 60 %.

Коэффициент внутреннего трения зерновых культур оказывает влияние на однородность смеси. Чем ближе будут между собой значения коэффициентов трения смешиваемых ингредиентов, тем однородность готовой смеси будет выше.

Зерновые культуры относятся к массам, обладающим одновременно свойствами твёрдых и квазитекучих сред.

При небольших нагрузках вне ёмкости они способны сохранять форму конуса или бурта с углом естественного откоса и проявлять некоторые упругие свойства.

Способность зерновых частиц к сыпучести в массе обеспечивает возможность их перемещения различными способами при относительно небольших затратах энергии по сравнению со сплошными твёрдыми телами. Сыпучесть твёрдых частиц обусловлена точечными, линейными и поверхностными контактами небольшой протяжённости и площади между разными по размерам и форме частицами зерновой массы. Небольшие коэффициенты трения и адгезионные силы между поверхностями частиц, смещение центров их тяжести, неплотное соприкосновение частиц, высокая жёсткость и относительная прочность зёрен способствуют лёгкому смещению частиц и изменению их положения относительно друг друга. Поэтому зерновые смеси не являются плотносвязными системами. Из-за неплотного прилегания частиц имеется

определённая скважность, равная отношению всего объёма зерновой массы к объёму, занимаемому только частицами этой массы.

Сыпучесть зерновой массы зависит от ряда факторов: вида зерновой массы, засорённости массы, её влажности, изменяющейся во времени насыпной плотности, адгезии и др. Характеристикой сыпучести может служить угол откоса, равный углу между образующей и горизонтальной плоскостью вороха.

Адгезия в сыпучих средах происходит на границе двух твёрдых тел. Течение сыпучей массы отличается от течения жидкообразных и упругопластичных масс, так как сыпучая среда не образует сплошной площади

контакта с твёрдой поверхностью. Контакт наблюдается между отдельными частицами сыпучей массы.

При длительном хранении сыпучих зерновых масс возникает их слёживаемость, проявляющаяся в увеличении насыпной плотности массы. Под влиянием различных факторов внешней среды, деформационных явлений в массе вороха или под действием вынужденных колебаний изменяется положение частиц в пространстве и наблюдается более плотная их упаковка, вызванная упорядочиванием центров тяжести частиц, что ведёт к снижению сыпучести массы.

Зерновая масса вследствие своей неоднородности имеет различия в реологических показателях входящих в неё фракций, что используется при сепарировании зерна. Так, различия в геометрических размерах зёрен и примесей (гранулометрический состав), в разной плотности и прочности кондиционных и неполноценных зёрен позволяют провести качественную очистку зерновой массы от посторонних примесей.

Вопросы для контроля

1. От каких основных факторов зависит эффективность процессов преобразования сырья в готовую продукцию?

2. Каким основным требованиям должно отвечать зерно, идущее на мукомольные заводы?

3. Каким основным требованиям должно отвечать зерно, идущее на производство крупы?

4. Каким основным требованиям должно отвечать зерно, идущее на производство комбикормов?

5. Из каких составных частей состоит зерно пшеницы? Каковы процентные соотношения этих частей?

6. Чем вызвана необходимость операции шелушения зерна при производстве крупы? Какие частицы получается при этой операции?

7. Каково процентное соотношение крахмала, белка, клетчатки и жиров в пшенице?

8. Из каких основных технологических операций состоит помол муки? Какие частицы получаются при этих операциях?

9. Каковы общие требования к фракционному содержанию круп?

10. Какие виды сырья используются при производстве комбикормов?

11. Какие показатели относятся к геометрическим характеристикам зерна?

12. На какие технологические процессы оказывают влияние геометрические характеристики зерна?

13. Какие показатели относятся к структурно-механическим показателям зерна?

14. От каких факторов зависит сыпучесть зерновой массы?

15. Что понимается под гранулометрическим составом черновой смеси? В каких технологических операциях должен учитываться гранулометрический состав?

Тема 6. Физико-механические свойства сырья, полуфабрикатов и готовой продукции

Ключевые вопросы темы

1. Физико-механические свойства сыпучего сырья.
2. Физико-механические свойства полуфабрикатов и готовой продукции.
3. Виды технологической обработки, приводящие к изменению реологических свойства сырья и готовой продукции.

Ключевые понятия: сепарирование, делимость, степень измельчения, шелушение, смешивание, энтропия смеси, сегрегация, связность.

Литература: [11, с. 110–134]

Методические рекомендации

Рациональная организация производства и оптимизация технологических процессов преобразования сырья в готовую продукцию основывается, прежде всего, на учёте особенностей строения и реологических свойств того или иного вида сырья.

Свойства сырья при динамическом воздействии рабочих органов машин в процессе его трансформирования в готовую продукцию рассмотрим на двух типичных представителях пищевых масс – упругом материале (зерновая масса) и вязкоупругом материале (мясном фарше).

Зерновое сырьё. Характеристики зерна как сырья при его переработке в муку, крупу или комбикорм основываются на следующих представлениях:

- зерно является сложным телом, состоящим из разнородных тканей эндосперма, зародыша и оболочек;
- зерно по своим физико-механическим свойствам и составу относится к анизотропным твёрдым телам;
- зерно имеет белково-углеводную полимерную структуру с присутствием липидов;
- зерно является биологически активным образованием.

Выбор динамических режимов работы машин в наибольшей степени зависит от структурно-механических свойств перерабатываемого сырья, влияющих на выход готовой продукции и её качество, энергопотребление и другие показатели.

Особенности операций сепарирования, измельчения, шелушения, шлифования, смешивания и др. напрямую связаны с деформационными характеристиками упругих зерновых частиц. Здесь основными критериями механических свойств частиц служат их твёрдость и прочностные характеристики.

Сепарирование. Исходная зерновая смесь содержит большое количество примесей: минеральных включений, частиц других культур и пр., которые должны быть удалены до переработки зерновой массы в готовую продукцию.

Удаление посторонних включений осуществляется сепарированием зерна, которое решает две локальные задачи – собственно удаление инородных включений из зерновой смеси и рассортирование этой смеси на фракции по размерам (по крупности).

На эффективность сепарирования смеси большое влияние оказывает такой её параметр, как делимость, характеризующая полноту разделения смеси на компоненты. Если кривые нормального распределения компонентов по размерам или скорости витания, построенные по ограниченной выборке, не пересекаются друг с другом, то делимость таких компонентов будет высокой или полной, а смесь может быть разделена с достаточно высокой эффективностью.

При сепарировании зерновых смесей используют следующие способы: сепарирование по размерам (просеивание на воздушно-ситовых сепараторах), сепарирование по форме (сепарирование на плоских ситах с отверстиями разной формы и в триерах), сепарирование по плотности (вибрационная стратификация), аэродинамическое или гидродинамическое сепарирование (разделение смеси на составляющие в воздушном или водном потоке), магнитное сепарирование, сепарирование по электрической полярности.

Измельчение. Зерновые культуры относятся к одним из самых распространённых видов пищевого сырья в рационе питания и являются объектом первоначального механического воздействия при многостадийном его преобразовании в разнообразную готовую продукцию. И первой технологической операцией такого воздействия является механическое измельчение цельной структуры зерна на отдельные частицы.

Процесс измельчения зерна от примитивного дробления и растирания, первых зернотёрок и жерновов с ручным приводом постепенно восходил к водяным и ветряным мельницам, затем мельницам с паровым двигателем, а к концу 90-х годов XIX века – к первым механизированным мельницам с широким набором транспортирующих устройств.

Процесс измельчения зерна имеет основной целью получение муки, круп или комбикормов, поэтому на мукомольных, крупяных или комбикормовых предприятиях изучающие машины являются основным видом технологического оборудования.

На комбикормовых заводах осуществляют простое механическое измельчение, на мукомольных и крупяных предприятиях идёт избирательный процесс с отделением семенной оболочки зерна, зародышей и плёнок (шелушение). Для удаления оставшихся зародышей и улучшения товарного вида продукта используются также операции шлифования и полирования.

Измельчение как механическая операция может быть реализовано различными способами. Выделяют следующие способы измельчения: резание; раздавливание (сжатие); истирание; разрыв (растяжение); изгиб; кручение; удар рабочего органа; нагоняющего свободно летящую частицу; удар летящей частицы о свободную поверхность и удар рабочего органа по фиксируемой частице (для твёрдых и хрупких зерновых культур); возможен и комплекс этих операций (удар с истиранием и т.п.).

Технология собственно измельчения, а также операций шелушения, шлифования и полирования определяется рядом факторов: назначением готовой продукции, физико-механическими свойствами и структурой зерновой массы, его прочностными и реологическими характеристиками, в зависимости от которых выбирают параметры рабочих органов и режимы обработки.

Известны различные конструкции и принципы действия измельчающих машин. Например, в вальцовых станках материал измельчается между вращающимися вальцами. В зерновых и шелушильных поставах частицы, перемещаясь под действием центробежных сил и сил трения между подвижным и неподвижным рабочими органами, подвергаются деформации сжатия и сдвига, что приводит к их измельчению. И вальцедековых машинах измельчение осуществляется в рабочем зазоре между вращающимся вальцом и неподвижной декой; в энтолейторе измельчение происходит за счёт энергии удара по частицам быстровращающегося рабочего органа. В аэроизмельчителях и аэрошелушителях используется энергия воздушного потока, ускоряющего движущиеся частицы и направляющего их к неподвижной поверхности. В молотковых дробилках измельчение идёт от ударного воздействия молотков и удара самих частиц о деку, в бичевых машинах продукт измельчается от ударного воздействия бичей и истирающего действия поверхности контакта.

Количественной оценкой степени измельчения частиц является их дисперсность, определяемая как величина, общая поперечному размеру частицы по миделю. Различают крупное, среднее, мелкое, тонкое, сверхтонкое и коллоидное измельчения.

При действии на частицу внешней нагрузки со стороны рабочего органа измельчающей машины внутри частицы возникают напряжения, приводящие к деформации массы. При дальнейшем увеличении силовых воздействий на частицу реакции связей внутри её становятся меньше величины этих воздействий, отчего наступает разрушение структуры частицы на более мелкие составляющие.

Гранулометрический состав зерна при сепарировании или сыпучих частиц при просеивании определяется распределением этих частиц по крупности. Графически это распределение изображается в виде гистограммы. Превалирующая компонента определяется максимальным содержанием *i-ой* фракции или модальным размером частиц в смеси.

Зерновой ворох как сыпучий материал сочетает в себе свойства твёрдых и жидких сред. Он обладает некоторой упругостью и способностью сохранять форму при небольших нагрузках, принимает форму ёмкости, в которую засыпан, а при высыпании на плоскость образует конус с углом естественного откоса. Данные свойства обуславливают поведение зерновой массы при погрузке, транспортировании и хранении. С технологических позиций важным показателем является сыпучесть зерновой массы, которая позволяет перемещать зерно механическим или пневматическим способом. Сыпучесть зерна обуславливается различием его характеристик по размерам, форме и зависит от влажности и засорённости зерновой массы, величины коэффициента трения.

Коэффициент внешнего трения характеризует сопротивление движению сыпучих частиц по поверхности, по которой перемещаются эти частицы.

Коэффициент внутреннего трения характеризует связь между отдельными частицами внутри сыпучего продукта.

В первом приближении принимают, что коэффициент внутреннего трения равен тангенсу угла естественного откоса. Угол *естественного откоса* – это

угол между образующей конуса свободно насыпанного массы на горизонтальную плоскость и касательной к этой плоскости.

Скважистость зерновой массы определяется выражением $100 (V_0 - V) / V_0$ %, где V_0 – общий объём зерновой массы;

V – объём частиц. Скважистость позволяет осуществлять продувку зерновой массы воздухом и способствует её пневмотранспортированию.

Анализ нормативных документов на зерно и продукты его потребления показывает, что значительная часть показателей качества (от 30 до 60 %).

Исследование гранулометрического состава зерна, крупы или муки может осуществляться на анализаторе зернопродуктов типа «Гран» (ООО Фототест), представляющем собой программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий наглядное изображение и цифровой анализ данных измерений гранулометрического состава сыпучих продуктов.

Анализатор включает интерфейс пользователя и персональный компьютер и позволяет получить информацию о гранулометрическом составе широкого спектра сыпучих пищевых масс при погрешности измерений не более 5 % с пропускной способностью 500 частиц в минуту.

Программное обеспечение измерительной системы позволяет:

- измерить геометрические показатели и определить гранулометрический состав смеси;

- определить стекловидность зерна по его поперечному срезу;

- исследовать цветовые показатели с помощью спектрофотометрии;

- создать локальную базу данных по различным образцам зернопродуктов.

Результатами цифрового анализа являются: размеры и форма зерна, крупность и выравненность зерновой массы, фракционный состав и содержание сорных примесей, результаты измерения стекловидности и цветовых характеристик.

Сортирование. Задача сортирования продуктов измельчения зерна заключается в разделении его на две фракции – сход и проход. Эффективность разделения зависит от гранулометрического состава продуктов измельчения и геометрии частиц, соотношения масс фракций крупности, удельной нагрузки на сито, массы сита, конструктивных особенностей отсева и его кинематических характеристик. Наличие крупных оболочек в виде пластинок затрудняет просеивание частиц эндосперма, поскольку затрудняется возможность распределения частиц по плотности, вследствие чего проходные частицы не успевают сместиться в нижний слой и просеиваются.

Шелушение. Шелушение относится к одной из основных технологических операций при производстве крупы.

Способы шелушения определяются прочностью связей оболочек и ядра зёрен, прочностью ядра, формой зерна.

Известны следующие способы шелушения:

- путём встречного движения двух поверхностей. Способ применяется для крупяных культур с несросшимися оболочками (шелушение является результатом совместного действия двух деформаций – сжатия и сдвига);

- многократным или однократным ударом зерна о рабочую поверхность. Способ однократного или многократного равновекторного удара не пригоден

для зёрен с хрупким ядром (гречиха), если требуется целая крупа. Однократный удар используется для зёрен, у которых оболочки не срослись с ядром (овёс);

- путём фрикционного воздействия на оболочку зерна двух радиусных абразивных поверхностей. Способ используется для зерновых культур, у которых оболочки прочно срослись.

Результатом шелушения крупяных культур является:

- шелушёное зерно – ядро без оболочек;
- нешелушёное зерно – зерно с неотделившимися оболочками;
- дроблёное ядро – частицы ядер малого размера;
- лузга – отделённые от ядра оболочки;
- мучка – мелко измельчённые частицы ядра и оболочек.

Динамика шелушения зерна по схемам б) и в) аналогична схемам при ударном измельчении, отличие в меньшей величине ударного импульса и скорости свободного полёта частиц.

Полуфабрикаты и готовые продукты, получаемые из растительного и животного сырья, представляют собой сложные комплексы, состоящие из сотен и тысяч молекул. Присутствие в составе пищевых масс различных видов веществ: белков, липидов, крахмала, полисахаридов, полипептидных цепочек аминокислот и др. обуславливает различие структурно-механических и физико-химических свойств полуфабрикатов и продуктов.

Переходы из одного физического состояния в другое при трансформации сырья в готовую продукцию совершаются путём сообщения телу кинетической энергии и совершении над ним работы. При этом в трансформируемом материале происходит изменение количества и характера связей между молекулами.

Воздействие на исходные продукты температуры и давления, добавление жидкости приводят к изменению их механических свойств и исходной структуры. Например, набухание белковых молекул муки при добавлении в неё воды при замесе теста приводит к появлению в тестовой массе свойств, характерных для полимерных масс – образуется упругая пластическая система, состоящая из клейковины, во внутренней структуре которой распределены 'растворимые в воде вещества. Вследствие этого тестовые полуфабрикаты проявляют свои специфические реологические свойства не только в виде упругости, но и текучести, характеризуемой течением, т.е. увеличивающимся во времени смещением частиц тела под действием постоянных сил. С увеличением вязкости скорость течения замедляется, что приводит к образованию ползучести. Течение теста может быть вязким, когда его инициируют небольшие касательные усилия, или пластичным, которое появляется после перехода нагрузок через предел текучести.

Реологические свойства тестовых полуфабрикатов. На различных технологических переходах, будь то замешивание, раскатывание, деление, слоение, округление и пр., тесто подвергается различным механическим воздействиям со стороны рабочих органов машин.

Формирование реологических свойств теста начинается на стадии замеса. Здесь происходит образование связей смешиваемых ингредиентов и образование однородной массы во всём объёме рабочего пространства дежи, а

также формирование набора реологических показателей тестовой массы. Реологическое поведение теста при замесе на тестомесильных машинах может быть опосредствованно оценено изменением величины крутящего момента во времени, приведённого к рабочему органу. В начальный период замеса на стадии гидратации муки и образования полидисперсной системы крутящий момент будет расти линейно. Далее с постепенным переходом тестовой массы к однородной вязкой среде и образованием коагуляционной структуры в объёме тестовой массы в различных её зонах возникают деформации сжатия, растяжения, сдвига или кручения, обусловленные силовым воздействием вращающегося по сложной траектории рабочего органа. Кривая изменения крутящего момента, относящаяся к данной стадии трансформации тестовой массы, уже не будет линейной. Переход к практически постоянной величине крутящего момента наступит тогда, когда возникшие в тестовой массе напряжения приведут к уменьшению прочности клейковинного каркаса. Этот момент соответствует наилучшей степени развития теста при замесе, поскольку дальнейшее силовое воздействие на тестовую массу будет приводить лишь к диссипации энергии и нагреванию вследствие этого тестовой массы, увеличивая её текучесть.

В структуре мучного теста присутствуют крахмальные зёрна, удлинённые частицы клейковины, частицы примесей, распределённые в сплошной водной среде. При небольшом объёмном сжатии тестовой массы её прочностные свойства изменяются незначительно. Например, при приложении давления до 0,5 МПа прочность образца возрастает всего на 1–1,2 %. Если одновременно со сжатием к тестовой заготовке приложить сдвиговую нагрузку, то в результате такого деформирования прочность заготовки может возрасти на 30 и более процентов. Это объясняется увеличением числа связей, сближением под действием давления и сдвиговой нагрузки белковых цепочек и образованием более жёсткой каркасной структуры, тогда как при увеличении простого объёмного давления происходит сближение меньшей части цепочек без образования прочного каркаса. Именно за счёт таких воздействий увеличивает прочность макаронного теста в производстве макаронных изделий.

Экструдированные пищевые материалы. В пищевой промышленности для выпуска экструдированных изделий в основном используют крахмалосодержащее и высокобелковое сырьё.

Экструзия является одной из разновидностей процесса прессования пищевых масс и заключается в продавливании пищевого сырья через профилирующие матрицы, в результате чего получается продукт требуемой формы. Экструзия определяется как метод формования продукта путём выдавливания.

Для получения экструдированных пищевых продуктов применяют три основных способа:

- метод холодной экструзии, при которой в продукте происходят только механические изменения;
- метод тёплой экструзии, при котором сухие компоненты сырья смешивают с определённым количеством воды и подают в экструдер, где, кроме механического, они подвергаются ещё и тепловому воздействию. При этом

получаемый экструдат отличается большой плотностью, пластичностью и имеет ячеистую структуру;

- метод горячей экструзии (термопластической экструзии), при котором может иметь место регулируемый подвод тепла непосредственно в продукт или через наружные стенки экструдера.

К основным факторам, характеризующим физико-механические свойства экструдированного продукта, относятся:

- модуль прессуемости, характеризующий способность продукта к уплотнению под действием прикладываемого давления;

- коэффициент бокового давления, характеризующий давление на стенки экструдера в зависимости от осевого давления;

- плотность пищевой массы;

- температура и влажность продукта;

- гранулометрический состав продукта.

Условия прессования определяются удельным давлением прессования, коэффициентом трения массы о рабочие элементы экструдера, формой получаемого продукта, режимом прессования и другими факторами.

Реологические свойства мясного фарша. Мясной фарш относится к пищевым полуфабрикатам, для которых характерно наличие предельного напряжения сдвига, что определяет его разное реологическое поведение до и после наступления этого предела.

Одним из способов получения мясного фарша является куттерование, при котором происходит тонкое измельчение мясного сырья, что позволяет получать продукт с определенными технологическими характеристиками. Измельчение на куттере относится к интенсивным динамическим процессам, существенно изменяющим физико-механические свойства исходного продукта, поэтому определение оптимальной продолжительности измельчения и ограничений по температуре и влажности имеет первостепенное значение для получения мясного фарша высокого качества.

В технологии куттерования выделяют три периода:

- начальный период – размер частиц меняется незначительно, добавленная вода перемешивается с частицами мяса;

- период интенсивного резания – быстрое изменение размеров частиц, поверхностно связанная частицами мяса влага, образование окончательной структуры фарша;

- третий период – увеличение числа мелких частиц, аэрирование массы и эмульгирование жира, коллоидно-химические изменения.

С реологических позиций получаемый фарш может рассматриваться как твердообразная система с упруго-вязко-пластичными свойствами и коагуляционной структурой.

При нагрузках ниже предела текучести реологическая модель может быть представлена линейной моделью между напряжением и деформацией. При увеличении напряжений развивается процесс упругого последствия, когда мгновенное уменьшение деформации происходит только до определённой величины, а затем наблюдается постепенное её уменьшение до нуля.

Экспериментальные исследования показывают, что при небольших напряжениях до 300 Па мясной фарш подчиняется закону Гука.

Переход от упругой деформации к явлению упругого последействия возникает при напряжении, превышающем предел упругости примерно на 100...150 Па.

Дальнейший рост напряжения приводит к явлению ползучести массы. При напряжении, близком к предельному, происходит частичное разрушение структуры и начинается пластично-вязкое течение с небольшим градиентом скорости. Эффективная вязкость для данного периода составляет примерно $5-10^5$ Па·с.

От начала течения до предельного разрушения структуры свойства фарша наиболее полно характеризуются эффективной пластической вязкостью и предельным напряжением сдвига. Эти показатели используются для определения условий движения продукта в рабочих зонах машин. Их численные значения соответствуют вполне определённой модели реальных тел, причём как для области разрушения структуры, так и для стабильных структур.

Реологические свойства мясного фарша существенно изменяются во время его перемещения и обработки. Так, силовое воздействие рабочих органов машин приводит к падению эффективной вязкости фарша, тогда как при транспортировании в продуктопроводах вязкость фарша вновь будет возрастать за счёт проявления эластичных его свойств и тиксотропного восстановления структуры.

Возрастание вязкости фарша в продуктопроводе приведёт к уплотнению массы из-за увеличения сопротивления движению, росту напряжений, а в результате – к увеличению величины давления, что в конечном итоге будет способствовать неравномерному и пульсирующему движению перемещаемой фаршевой массы.

Вопросы для контроля

1. Какие базовые представления положены в основу характеристик зернового сырья?

2. С какими структурно-механическими свойствами связаны динамические операции сепарирования, измельчения и смешивания?

3. Какими способами осуществляется сепарирование зерновой смеси?

4. Какими способами может осуществляться измельчение растительного сырья? От каких реологических свойств зависит выбор того или иного способа измельчения?

5. Что служит количественной оценкой степени измельчения?

6. Какими количественными показателями оценивается гранулометрический состав продуктов измельчения?

7. На какие составные части расходуется работа, затрачиваемая на дробление исходного сырья?

8. Какими динамическими соотношениями описывается ударное взаимодействие рабочего органа и измельчаемой частицы при свободном её движении в зоне измельчения?

9. В чём состоит назначение операции сортирования продуктов измельчения?

10. От каких параметров зависит критическая скорость движения частицы при её просеивании на плоском решете?

11. От каких параметров зависит критическая скорость движения частицы при её просеивании в цилиндрическом барабане?

12. Какие существуют способы шелушения зерна? В зависимости от каких факторов выбирается тот или иной способ?

13. Какие частицы являются результатами шелушения крупяных культур?

14. Каково назначение процесса смешивания частиц разных компонентов?

15. Какими показателями оценивается качество смешивания?

Тема 7. Реологические свойства коллоидных систем

Ключевые вопросы темы

1. Понятие коллоидных систем.

2. Реомеханика коллоидных систем.

3. Теория устойчивости лиофобных коллоидов.

4. Структурообразователи.

Ключевые понятия: коллоидная система, полимеры, коагуляция, структурообразование, диспергирование, матричная структура.

Литература: [9, с. 88–102]

Методические рекомендации:

Коллоидная или дисперсная система (colloidal dispersion; colloid) – система, состоящая как минимум из двух фаз. При этом одна из них, именуемая дисперсной фазой, раздроблена до частиц, капель или пузырьков, имеющих размер от 1 до 1000 нм, и распределена в другой сплошной фазе, которую называют дисперсионной средой. Отдельные частицы дисперсной фазы представляют собой агрегаты, которые состоят из множества молекул и обладают всеми термодинамическими свойствами раздробленного вещества. Все дисперсные системы характеризуются признаками, которые определяют их особые свойства: гетерогенность – признак, указывающий на наличие межфазной поверхности, и дисперсность – признак, который определяется размерами и геометрией коллоидных частиц. Под влиянием внешних воздействий дисперсная фаза способна сравнительно легко выделяться (коагулировать) из жидкой дисперсной системы (золя), в результате чего формируется осадок из слипшихся коллоидных частиц – протекает процесс структурообразования и система приобретает новые свойства.

Коллоидные явления и дисперсные системы широко распространены в химической технологии. Реакционные системы могут находиться в аппаратах в виде суспензий, паст, пульп, эмульсий, порошков, что необходимо учитывать при определении оптимальных режимов перемешивания, фильтрования, транспортировки и других технологических операций. Поэтому в практическом отношении важно изучение таких свойств коллоидных систем, как вязкость, текучесть, пластичность, упругость, прочность и т.д. Так как эти свойства непосредственно связаны со структурой тел, их обычно называют структурно-механическими.

Изучению структурно-механических свойств различных дисперсных систем посвящена физико-химическая механика или реология (rheos – течение, logos – учение). Реология – наука о деформациях и течении материальных тел под действием внешних напряжений.

Большое практическое значение в настоящее время имеют растворы высокомолекулярных соединений (ВМС) – полимеров. В отличие от зелей растворы ВМС являются гомогенными истинными растворами и относятся к молекулярно-дисперсным лиофильным термодинамически устойчивым системам. Несмотря на то, что растворы полимеров не являются типично коллоидными растворами, между данными системами существует сходство, обусловленное одинаковыми размерами макромолекул ВМС и частиц дисперсной фазы. Так же как и для зелей, для растворов ВМС характерны светорассеяние, электрокинетические свойства и способность к структурообразованию, что позволяет рассматривать многие проблемы одновременно для систем обоих типов, в том числе и с точки зрения их вязкотекучих свойств.

При изменении температуры, введении электролитов, механическом воздействии, увеличении концентрации дисперсной фазы свойства коллоидного раствора постепенно изменяются до тех пор, пока не наступит коагуляция, т.е. разрушение дисперсной системы под действием внешних факторов, сопровождающееся самопроизвольным переходом дисперсной фазы в осадок, состоящий из частично слипшихся друг с другом частиц. Рыхлость такого осадка может изменяться в широких пределах: от плотного осадка до студня, или геля. В коллоидной химии гелями (gelo – застываю) называют дисперсные системы с жидкой дисперсионной средой, в которых частицы дисперсной фазы образуют пространственную структурную сетку. Гели, образованные из растворов ВМС, называются студнями.

Согласно наиболее признанной и распространенной теории устойчивости лиофобных коллоидов ДЛФО (Дерягина-Ландау-Фейрвея-Овербека) характер взаимодействия частиц дисперсной фазы непосредственно отражает устойчивость дисперсных систем и закономерности их коагуляции. Общая энергия взаимодействия между частицами ($U(h)$) равна сумме энергий электростатического отталкивания (U_{rep}) и молекулярного притяжения (U_{att}), и их соотношение определяет поведение дисперсных систем. Устойчивость или скорость коагуляции зависят от знака и значения общей потенциальной энергии $U(h)$. Положительная энергия отталкивания U_{rep} с увеличением расстояния h между частицами уменьшается по экспоненциальному закону, а отрицательная энергия притяжения U_{att} – обратно пропорционально квадрату расстояния.

В результате на малых расстояниях (при $h \rightarrow 0$ $U_{rep} \rightarrow \text{const}$, а $U_{att} \rightarrow -\infty$) и больших расстояниях (экспонента убывает значительно быстрее, чем степенная функция) между частицами преобладает энергия притяжения, а на средних расстояниях – энергия электростатического отталкивания.

Таким образом, на кривой зависимости общей энергии взаимодействия от расстояния $U(h)=f(h)$ возникают два минимума энергии с отрицательным значением энергии, которые соответствуют коагуляции коллоидных частиц, и максимум с положительной энергией, который характеризует потенциальный

барьер, препятствующий слипанию дисперсной фазы. В первичном потенциальном минимуме (I) частицы находятся в непосредственном контакте, между ними возникает химическое взаимодействие (возникают химические связи), приводящее к образованию компактного осадка. Во вторичном потенциальном минимуме (II) взаимодействующие частицы разделены слоем дисперсионной среды, непосредственного контакта нет, возникают межмолекулярные силы притяжения. Таким образом, возникают различные по характеру структуры.

В процессе коагуляции в результате взаимодействия коллоидных частиц, их агрегации, сцепления и т.д. происходит структурообразование, т.е. образование пространственной структурной сетки из частиц дисперсной фазы. Следует отметить, что сила отталкивания между коллоидными частицами зависит также от радиуса кривизны их поверхности. Чем больше радиус кривизны частиц, тем сильнее они отталкиваются. Поэтому, структурообразование протекает легче в дисперсных системах, содержащих палочкообразные частицы, а не сферические. При этом слипание частиц протекает преимущественно выступами, имеющими меньший радиус кривизны, по сравнению с боковыми поверхностями, что приводит к образованию пространственной структурной сетки, положение составных частей тела: атомов, молекул, мелких частиц. Таким образом, системы, образующиеся в результате коагуляции коллоидных растворов, а также концентрированные растворы ВМС являются структурированными. К ним относятся почва, глины, цементы, большинство пищевых продуктов, краски, смазки, косметические изделия и т.д. Следует отметить, что многие фармацевтические и биологические препараты, в том числе и кровь, также могут проявлять свойства структурированных жидкостей.

Вопросы для контроля

1. Что такое синерезис?
2. Назовите типы структур в коллоидных системах. Чем они отличаются?
3. Образование и свойства конденсационно-кристаллизационных структур.
4. Образование и свойства коагуляционных структур.
5. Какие структуры образуются при взаимодействии коллоидных частиц на малом расстоянии? Их свойства.
6. Какие структуры образуются при дальнем взаимодействии коллоидных частиц? Их свойства.
7. Какие тела обладают полной механической и термодинамической обратимостью?
8. Какие тела обладают полной механической и термодинамической необратимостью?
9. Модель пластического поведения тела.
10. Модель упругого поведения тела.
11. Уравнение Ньютона. Границы его применения.
12. Поведение каких систем описывается уравнением Гука? Приведите его.
13. Поведение каких систем описывается уравнением Бингама. Приведите его.
14. Модель вязкого поведения тела.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практические занятия проводятся с целью формирования у студентов умений и навыков интерпретации и обработки результатов исследований реологических свойств различных масс.

Практические занятия по дисциплине «Реология пищевых масс» являются важной составной частью учебного процесса изучаемого курса, поскольку помогают лучшему усвоению курса дисциплины, закреплению знаний.

В ходе самостоятельной подготовки студентов к практическому занятию необходимо не только воспользоваться литературой, рекомендованной преподавателем, но и проявить самостоятельность в отыскании новых источников, связанных с темой практического занятия.

Тематический план практических (ПЗ) занятий представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Объем (трудоемкость освоения) и структура ПЗ направления «Технология продукции и организация общественного питания»

Номер темы	Содержание практического (семинарского) занятия	Кол-во часов ПЗ
1	Расчёт трубопроводного транспорта для перемещения пищевого продукта	2
2	Расчет процесса дозирования пищевого продукта	2
3	Определение вискозиметрической константы Хаггинса	2
4	Исследование зависимости вязкости полимера от температуры	2
5	Исследование зависимости вязкости растворов полимеров от концентрации	2
Итого		10

Практическая работа № 1: Расчёт трубопроводного транспорта для перемещения пищевой массы

Цель: получить навыки и умения расчета трубопроводного транспорта для перемещения пищевой массы.

Задание по практической работе: на основании исходных данных рассчитать объемный расход продукта, диаметр трубопровода, градиент скорости, напряжение сдвига, потери давления, а также подобрать насос и электродвигатель.

Методические рекомендации

При переработке пищевых масс, как в молочной, так и в хлебопекарной, кондитерской и макаронной промышленности, в качестве межоперационного транспорта применяется трубопроводный транспорт.

Перед проектированием трубопроводного транспорта необходимо определить следующие параметры: диаметр трубопровода, давление продукта на входе в трубу и мощность для выполнения прочностных расчётов и для подбора двигателя.

I. Исходные параметры.

1. Рецепттура.

2. Производительность трубопровода M_C , кг/с:

$$M_C = \frac{M_{CM}}{3600 \cdot t_p},$$

где M_{CM} – выработка за смену, кг; t_p – эффективное время работы в смену, ч.

3. Общая длина трубопровода l , м, с учётом поворотов (отношение радиуса закругления к диаметру трубы должно быть больше *шести*, с тем чтобы не учитывать потери в местных сопротивлениях).

II. Выбираемые параметры.

Скорость движения продукта по трубопроводу w_0 , м/с, (чем больше вязкость продукта, тем меньше скорость).

III. Расчётные параметры.

1. Объёмный расход V_C , м³/с:

$$V_C = \frac{M_C}{\rho}.$$

Диаметр трубопровода d_0 , м:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4V_C}{\pi w_0}}.$$

По значению диаметра d_0 по ГОСТу выбирают ближайшую величину d , м. Действительную среднюю скорость w , м/с, вычисляют по формуле:

$$w = \frac{4V_C}{\pi d^2}.$$

2. Консистентную переменную (градиент скорости) $\dot{\varepsilon}$, 1/с, вычисляют по формуле:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{8w}{d}.$$

Безразмерная консистентная переменная:

$$\dot{\varepsilon}_* = \frac{8w}{\dot{\varepsilon}_1 d},$$

где $\dot{\varepsilon}_1 = 1$, т.е. градиент скорости, равный единице его измерения.

3. Консистентную переменную (напряжение сдвига) τ , Па, определяют по формуле:

$$\tau = A_1 \dot{\varepsilon}_*^n = A_1 \left(\frac{8w}{\dot{\varepsilon}_1 d} \right)^n,$$

или

$$\tau = \frac{pd}{4l},$$

где A_1 – напряжение сдвига при единичном значении градиента скорости, Па; n – индекс течения; p – потери давления или давление на выходе из насоса, Па.

Величины A_1 и n выбирают по таблицам или определяют по формулам:

$$A_1 = B_0^* \dot{\epsilon}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n,$$
$$n = 1 - m,$$

где B_0^* – эффективная вязкость, Па·с, при единичном значении градиента скорости; m – темп разрушения структуры соответственно.

4. Потери давления p , Па – давление продукта на выходе из насоса, определяют по формуле:

$$p = \frac{4l\tau}{d}.$$

Полезная мощность насоса N , кВт:

$$N = pV_C \cdot 10^{-3}.$$

Выбор оборудования.

I. Насос выбирают по требуемой производительности трубопровода M_C или $M_{ч} = 3600 M_C$, принимая во внимание, что объёмный к.п.д. составляет $0,5 \div 0,6$.

II. Мощность электродвигателя $N_{ЭД}$, кВт:

$$N_{ЭД} = \frac{\alpha}{K_{\Pi}} \left(\frac{N}{K_{Н}} + \frac{N_{Ш}}{K_{Ш}} \right),$$

где α – коэффициент запаса мощности (для коротких трубопроводов до 5 м $\alpha = 1,2$; для длинных $\alpha = 1,5$); K_{Π} , $K_{Н}$, $K_{Ш}$ – к.п.д. соответственно механических передач от электродвигателя к насосу, насоса и шнеков (питателей); N , $N_{Ш}$ – полезная мощность, развиваемая насосом и шнеком соответственно, кВт.

Электродвигатель выбирают по каталогу.

Контрольные вопросы:

1. Что такое предел текучести?
2. Что изучает реология?
3. Какие существуют типы деформации?
4. Что такое пластическое течение тела?
5. Что такое деформация?
6. Что такое течение?
7. Что такое относительная деформация сдвига?
8. Что такое напряжение сдвига?
9. Что такое тиксопропия?
10. Что такое синерзис?

Практическая работа № 2: Расчет процесса дозирования пищевого продукта

Цель: получить навыки и умения расчета процесса дозирования пищевого продукта.

Задание по практической работе: на основании исходных данных рассчитать полное оптимальное давление и составляющие общего давления.

Методические рекомендации

Процессы дозирования по назначению чрезвычайно многообразны. Одной из основных задач дозирования является создание базы для механизации и автоматизации производственных процессов при одновременном обеспечении точности и соблюдения рецептуры. Наиболее типичными функциями дозирования являются отмеривание продукта по заданному объёму, массе, длине и поддержке заданного объёмного или массового расхода.

Различают два метода дозирования: по объёму и по массе. При объёмном дозировании реологические свойства продукта и способ заполнения формы определяют процесс и конструкцию машины, при массовом – имеют второстепенное значение. Поэтому рассмотрим только первый способ на примере дозирования пластично-вязких масс. Схематически метод объёмного дозирования можно представить как отмеривание определённого объёма продукта и заполнение тары. В одну тару можно дозировать несколько компонентов. Поскольку продукты являются труднотекучими, то их подачу в рабочие органы следует осуществлять принудительно: с помощью напорных шнеков или лопастей, насосов или поршневых шприцев.

При конструировании дозирующих устройств обычно исходят из кинематики питающих устройств, не увязывая кинетические расчёты с динамикой течения продукта и его реологическими свойствами. Заполнение формы пластично-вязким продуктом представляет собой нестационарный процесс. Продукт, подходя к форме, деформируется и движется в ней, имея выпуклую верхнюю поверхность. При подходе к крышке или дну формы скорость продукта замедляется и начинается заполнение углового пространства. Процесс считается законченным, когда весь объём формы занят продуктом. Необходимое для этого давление складывается из следующих составляющих: потери в местных сопротивлениях – внезапное сужение на входе в форму p_M ; потери при движении по длине формы $p_{дл}$ и давление, необходимое для окончательного заполнения формы $p_{сж}$ (его величину определяют в центре крышки, когда угловые пространства заполнены продуктом).

Продолжительность заполнения формы обычно известна. Поэтому в качестве основной расчётной величины можно принять полное давление, которое необходимо создать перед формой для её заполнения в заданный промежуток времени. Если давление превышает необходимое, то продукт сжимается, плотность его увеличивается, что приводит к увеличению массы дозы. При недостаточном давлении масса дозы получается меньше установленной.

Таким образом, полное оптимальное давление p , P_a , перед входом в форму составит:

$$p = p_M + p_{дл} + p_{сж}.$$

Составляющие общего давления вычисляют по зависимостям:

$$p_M = A_2 \theta_0^{0,4} d_{\text{Э}}^{-0,86} w^{0,56};$$

$$p_{дл} = C_1 l d_{\text{Э}}^{-1} \eta_{\text{ЭФ}} \rho_{\text{отн}} w;$$

$$p_{сж} = D \cdot 10^{aw^*},$$

где A_2 , C_1 , D – эмпирические коэффициенты; l , $d_э$ – длина дозатора и эквивалентный диаметр поперечного сечения; w – средняя скорость заполнения дозатора, м/с; w^* – кинематический коэффициент, зависящий от средней скорости движения продукта в дозаторе; a – геометрический коэффициент, зависящий от площади сечения дозатора F , м, его формы и специфики заполнения углового пространства у дна, последнее отражается величиной a^* .

$$w^* = w + 0,004,$$
$$a = 56 (F \cdot 10^2)^{2,5} + a^*.$$

Предельное напряжение сдвига и эффективную вязкость берут из таблиц или рассчитывают на основе экспериментальных данных.

Контрольные вопросы:

1. Назовите типы структур в коллоидных системах. Чем они отличаются?
2. Образование и свойства конденсационно-кристаллизационных структур.
3. Образование и свойства коагуляционных структур.
4. Какие структуры образуются при взаимодействии коллоидных частиц на малом расстоянии? Их свойства.
5. Какие структуры образуются при дальнейшем взаимодействии коллоидных частиц? Их свойства.
6. Какие тела обладают полной механической и термодинамической обратимостью?
7. Какие тела обладают полной механической и термодинамической необратимостью?
8. Модель пластического поведения тела.
9. Модель упругого поведения тела.
10. Уравнение Ньютона. Границы его применения.

Практическая работа № 3: Определение вискозиметрической константы Хаггинса

Цель: получить навыки и умения по работе с вискозиметром и расчета вискозиметрического параметра полимера.

Задание по практической работе: провести исследование зависимости вязкости полимера от его концентрации при постоянной температуре и определить вискозиметрическую константу Хаггинса.

Методические рекомендации:

Тщательно промывают вискозиметр дистиллированной водой. Из указанной преподавателем исходной системы готовят пять-шесть растворов различной концентрации. Первоначально измеряют время истечения растворителя, а затем приготовленных растворов. Измерения времени истечения следует проводить в порядке возрастания концентрации растворов. В данном случае после очередного опыта вискозиметр можно не мыть. Время истечения каждого раствора фиксируют 3–4 раза.

По уравнению рассчитывают величины динамической вязкости исследуемых систем, удельную вязкость и приведенную вязкость. Температурная зависимость вязкости растворителей используется из справочника и сообщается преподавателем. Экспериментальные и расчетные данные сводят в таблицу

По результатам расчетов строят график зависимости приведенной вязкости от температуры. Согласно теории Хаггинса при малых концентрациях вискозиметрическую константу можно найти через тангенс угла наклона линейного участка построенной зависимости. По определенному значению делают вывод о сродстве растворителя и полимера.

Контрольные вопросы:

1. Поведение каких систем описывается уравнением Бингама. Приведите его.
2. Модель вязкого поведения тела.
3. Вид зависимостей при вязком поведении тела.
4. Вид реологической кривой для систем с вязким поведением
5. Вид зависимостей для ньютоновских жидкостей.
6. Вид зависимостей при упругом поведении тела.
7. Вид реологической кривой для системы с пластическим течением.
8. Вид зависимостей для неньютоновских жидкостей.
9. Вид реологической кривой для реальных систем.
10. Дайте определение понятиям: структурообразование, структура, структурированная система.

Практическая работа № 4: Исследование зависимости вязкости полимера от температуры

Цель: получить навыки и умения по определению вязкости полимера.

Задание по практической работе: провести исследование зависимости вязкости раствора полимера от температуры.

Методические рекомендации:

Тщательно промывают вискозиметр проточной, а затем ополаскивают дистиллированной водой. Для указанной преподавателем системы готовят раствор определенной концентрации. Первоначально 3–4 раза измеряют время истечения чистого растворителя при комнатной температуре. Затем переходят к измерению времени истечения растворов полимера, начиная с комнатной температуры. Для проведения исследования при более высоких температурах вискозиметр с помощью держателя закрепляют в термостате, снабженном переносным нагревателем и мешалкой. Включают в сеть переносной нагреватель в специальную розетку, укрепленную на панели термостата. Включают термостат, устанавливая тумблеры «Нагрев» и «Мешалка» в положение «ВКЛ».

Измерение времени истечения проводится при температурах, близких к 25, 30, 40 и 50 °С. Для регулировки и поддержания температуры используют контактный термометр. Устанавливают наименьшую из указанных температур. Для этого необходимо ослабить винт крепления магнитной головки контактного термометра. Вращением головки в верхней части термометра перемещают указатель температуры на заданное значение. Через 3–4 мин фиксируют температуру в термостате по контрольному термометру, после чего можно приступить к измерению времени истечения. Опыт повторяют 3–4 раза. Затем устанавливают следующую температуру, после чего проводят аналогичные замеры времени истечения растворителя.

После окончания работы необходимо закрыть водопроводную воду, отключить переносной нагреватель и термостат, вынуть вискозиметр и тщательно промыть его водой.

Изменение плотности воды, а соответственно и разбавленных растворов полимеров в предлагаемом интервале температур не превышает 1 %, т.е. значительно меньше погрешности измерения времени их истечения.

Экспериментальные и расчетные данные сводят в таблицу. По полученным данным строят графики зависимости вязкости полимера от температуры, по которым находят значение предэкспоненциального коэффициента A и энергию активации вязкого течения E . Объясняют характер полученных зависимостей.

Контрольные вопросы:

1. Причины структурообразования в дисперсных системах.
2. Какие механические свойства характерны для структурированных систем?
3. Уравнение Марка-Куна-Хаувинка. Его назначение.
4. Как определить характеристическую вязкость. Определение по ней молекулярной массы.
5. Понятие относительной вязкости. Вид зависимости $\eta_{\text{отн}}=f(\square)$. Определение по ней коэффициента, определяющего форму коллоидной частицы.
6. Как рассчитать вязкость дисперсной системы по времени истечения жидкости из капилляра?
7. Уравнение Пуазейля. Обозначить физический смысл входящих в него символов.
8. Образование и свойства гелей и студней.
9. Уравнение Эйнштейна. Границы его применения.
10. Зависимость вязкости дисперсных систем от температуры. Обозначить физический смысл символов входящих в уравнение.

Практическая работа № 5: Исследование зависимости вязкости растворов полимеров от концентрации

Цель: получить навыки и умения по определению вязкости раствора полимера.

Задание по практической работе: провести исследование зависимости вязкости полимера от его концентрации при постоянной температуре, проверить применимость уравнения Эйнштейна к данной системе.

Методические рекомендации

Тщательно промывают вискозиметр дистиллированной водой. Из указанной преподавателем исходной системы готовят пять-шесть растворов различной концентрации. Первоначально измеряют время истечения растворителя, а затем приготовленных растворов. Измерения времени истечения следует проводить в порядке возрастания концентрации растворов. В данном случае после очередного опыта вискозиметр можно не мыть. Время истечения каждого раствора фиксируют 3–4 раза.

Для исследуемых растворов по концентрации рассчитывают объемную долю дисперсной фазы. Объемная доля определяется как отношение объема дисперсной фазы к объему дисперсной системы.

Рассчитывают величины вязкости исследуемых систем и удельную вязкость. Температурная зависимость вязкости растворителей выдается преподавателем. По результатам расчетов строят графики зависимостей вязкости растворов полимеров от концентрации, на основании которых делают вывод о применимости уравнения Эйнштейна к изучаемой системе.

Контрольные вопросы:

1. Выведите и обоснуйте формулу для расчета вязкости относительным методом.
2. Типы вискозиметров. Принцип действия и устройство капиллярных вискозиметров.
3. Принцип действия ротационных и шариковых вискозиметров.
4. Как рассчитать постоянную вискозиметра? Какое уравнение лежит в основе этого расчета?
5. Что такое постоянная вискозиметра? Как с ее помощью определить вязкость дисперсной системы?
6. Методы определения вязкости. Расчет вязкости по времени истечения жидкости из капилляра.
7. Обоснование определения вязкости с помощью капиллярного вискозиметра относительным методом.
8. Что такое изоэлектрическая точка полиамфолита? Как ее определить?
9. Зависимость вязкости от концентрации дисперсной среды.
10. Вид реологических зависимостей для структурированных жидкостей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авроров, В. А. Оборудование предприятий общественного питания и средства его оснащения: учебное пособие для вузов / В. А. Авроров. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 548 с.
2. Авроров, В. А. Процессы и оборудование. Моделирование, исследования, инновационные конструкторские разработки: учеб. пособие для вузов / В. А. Авроров. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 260 с.
3. Антипова, Л. В. Технология обработки сырья: мясо, молоко, рыба, овощи: учеб. пособие / Л. В. Антипова, О. П. Дворянинова; под науч. ред. Л. В. Антиповой. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 204 с.
4. Богданов, В. Д. Рыбные продукты с регулируемой структурой: учеб. пособие / В. Д. Богданов. – Москва: Мир, 2005. – 309 с.
5. Гавронская, Ю. Ю. Коллоидная химия: учебник и практикум для вузов / Ю. Ю. Гавронская, В. Н. Пак. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 287 с.
6. Горбатов, А. В. Реология мясных и молочных продуктов / А. В. Горбатов. – Москва: Пищевая промышленность, 1979. – 383 с.
7. Ильичев, А. Ф. Основы реологии: учеб. пособие / А. Ф. Ильичев; Калинингр. гос. техн. ун-т. – Калининград: КГТУ, 2001. – 35 с.
8. Ковалева, И. П. Свойства продуктов питания, их значение в оценке качества и безопасности: учеб. пособие для студентов высш. учебн. заведений по направлениям: 260100 - Технология продуктов питания; 260302 - Технология рыбы и рыб. продуктов; 260501 - Технология продуктов обществ. питания / И. П. Ковалева, И. М. Титова, О. П. Чернега; Калинингр. гос. техн. ун-т. – Калининград: КГТУ, 2010. – 172 с.
9. Коллоидная химия. Примеры и задачи: учеб. пособие / В. Ф. Марков, Т. А. Алексеева, Л. А. Брусницына, Л. Н. Маскаева. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 186 с.
10. Крусъ, Г. Н. Методы исследований молока и молочных продуктов: учеб. / Г. Н. Крусъ, А. М. Шалыгина, З. В. Волокитина. – Москва: Колос, 2000. – 367 с.
11. Максанова, Л. А. Высокомолекулярные соединения и материалы для пищевой промышленности: учеб. пособие для вузов / Л. А. Максанова, О. Ж. Аюрова. – 2-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 220 с.
12. Маслова, Г. В. Реология рыбы и рыбных продуктов / Г. В. Маслова; А. М. Маслов. – Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 214 с.
13. Мачихин, Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин, С. А. Мачихин. – Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 215 с.
14. Мусина, О. Н. Реология: учеб. пособие / О. Н. Мусина. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 146 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&i_d=278883 (дата обращения: 15.07.2020). – Текст: электронный.

15. Панов, Ю. Т. Оборудование предприятий общественного питания: учебник для вузов / Ю. Т. Панов, Б. В. Чаблин, И. А. Евдокимов. – 2-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 719 с.
16. Пасько, О. В. Технология продукции общественного питания: учебник для вузов / О. В. Пасько, Н. В. Бураковская, О. В. Автюхова. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 203 с.
17. Рыба, рыбные и другие продукты моря в рациональном питании: учеб. пособие для вузов / Л. Н. Плохотнюк [и др.]; под ред. Л. Н. Плохотнюка. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 157 с.
18. Сологубова, Г. С. Организация производства и обслуживания на предприятиях общественного питания: учебник для вузов / Г. С. Сологубова. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 396 с.
19. Структура и текстура пищевых продуктов: продукты эмульс. природы / под ред. Б. М. МакКенн; пер. Ю. Г. Базарнова. – Санкт-Петербург: Профессия, 2008. – 471 с.
20. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов: справочник / под ред. А. В. Горбатова. – Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 293 с.
21. Технология функциональных продуктов питания: учеб. пособие для вузов / Л. В. Донченко [и др.]; под общ. ред. Л. В. Донченко. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 176 с.
22. Физическая и коллоидная химия: учебник для вузов: в 2 ч. / В. Ю. Конюхов [и др.]; под ред. В. Ю. Конюхова, К. И. Попова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – Ч. 1: Физическая химия. – 259 с.
23. Физическая и коллоидная химия: учебник для вузов: в 2 ч. / В. Ю. Конюхов [и др.]; под ред. В. Ю. Конюхова, К. И. Попова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – Ч. 2: Коллоидная химия. – 309 с.
24. Царегородцева, Е. В. Физико-химические и биохимические процессы в мясе и мясных продуктах: учебник и практикум для вузов / Е. В. Царегородцева. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 229 с.
25. Чаблин, Б. В. Оборудование предприятий общественного питания. Практикум: учеб. пособие для вузов / Б. В. Чаблин, И. А. Евдокимов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 349 с.
26. Щукин, Е. Д. Коллоидная химия: учебник для вузов / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – 7-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 444 с.

Локальный электронный методический материал

Олег Вячеславович Агеев

РЕОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ МАСС

Редактор Е. Билко

Уч.-изд. л. 4,6. Печ. л. 3,4

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»,
236022, Калининград, Советский проспект, 1