

## ИНЖЕНЕРНАЯ РЕОЛОГИЯ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**В. В. Коган, Л. Э. Семенова**

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

В технологических процессах пищевой промышленности, обеспечивающих получение готового продукта с заранее заданными свойствами, многие виды продовольственного сырья и полуфабрикатов являются объектами изучения инженерной реологии, рассматривающей их поведение на этапе деформации (сжатия, скручивания, растяжения). Процессы перемешивания и межоперационного транспортирования продукции связаны с взаимодействием вязко-пластичного сырья (тесто, фарши, конфетная масса) с рабочими органами машин, поэтому в целях рационального использования и экономии материальных ресурсов выбор параметров процесса, а также режимов работы оборудования должен осуществляться с учетом реологических свойств продуктов (сдвиговые, поверхностные, объемные). Приведен перечень и сущность этих свойств. Определены и проанализированы основные сдвиговые характеристики исследуемого сырья. Рассмотрены особенности проявления упругих, вязких и пластичных свойств продукта под воздействием напряжений. Изучены комбинации реологических моделей простых идеализированных тел: вязко-пластичные, упруго-пластичная. Приведены уравнения, описывающие течение различных вязко-пластичных сред, графически представлена зависимость эффективной вязкости от напряжения или скорости сдвига для тефтельного фарша из рыбы. Прослежено влияние влажности фарша на структурно-механические свойства тефтельного фарша из свежельовленных сазана, щуки, сома, леща. Реологические характеристики определяли на ротационном вискозиметре РВ-8. Пробы готовили для одного образца из каждого продукта путем добавления различного количества воды с последующим перемешиванием и термостатированием. Параллельно определяли содержание жира. По полученным значениям структурно-механических характеристик можно судить о реологических свойствах тефтельных рыбных фаршей в широком диапазоне переменных величин. Из полученных данных следует, что с увеличением влажности числовые значения всех сдвиговых характеристик уменьшаются в связи с утолщением жидкостных прослоек между частицами продукта, а темп механической структуры практически не изменяется.

**Ключевые слова:** реология, пищевые продукты, сырье, структура, деформация, напряжения, упругость, пластичность, вязкость, рыбный фарш, вискозиметрия.

**Для цитирования:** Коган В. В., Семенова Л. Э. Инженерная реология в пищевой промышленности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2019. № 4. С. 147–156. DOI: 10.24143/2073-5529-2019-4-147-156.

### Введение

Для внедрения безотходных и малоотходных технологий в приготовлении продукции из рыбного фарша необходимо использовать не только традиционные объекты промысла, но и различные некондиционные части рыб, которые не используют при традиционном производстве основного ассортимента. Однако выпуск такой продукции сдерживается из-за несовершенства оборудования для ряда технологических процессов, в том числе перемешивания и транспортирования фарша по технологическим трубопроводам. Это заставляет искать пути интенсификации технологических процессов, создавать принципиально новые средства механизации и автоматизации обработки рыбной продукции.

### Состояние проблемы

Основная масса кулинарной рыбной продукции представляет собой структурированные дисперсные системы, характеризуемые сложным комплексом вязко-упруго-пластичных свойств. Для изучения различных процессов текучести и деформирования реальных тел, в том числе и пищевых продуктов, применяют реологические методы. Реология изучает структурно-механические свойства реальных тел, исследует движение этих структур в рабочих органах машин

и аппаратов. С учетом полученных результатов создаются методики инженерных расчетов, которые связывают геометрические размеры устройств с кинематическими и динамическими параметрами потока и учитывают реологические свойства перерабатываемого продукта.

В процессе переработки сырье и полуфабрикаты растягиваются, сжимаются, т. е. находятся в условиях сложного напряженного состояния. Поведение продукта при этом характеризуется его структурно-механическими свойствами: предельным напряжением сдвига ( $\Theta_0$ ), пластичной эффективной вязкостью ( $\eta_{пл}$ ,  $\eta_{эф}$ ), плотностью ( $\rho$ ), темпом разрушения структуры ( $m$ ), индексом течения ( $n$ ). Они зависят от характера взаимодействия молекул и частиц, наличия влаги в продукте, внутреннего строения и компонентного состава объекта, а также типа структуры.

По классификации П. А. Ребиндера существует два вида структур: коагуляционные и конденсационно-кристаллизационные. Коагуляционные системы могут находиться в твердом или жидкообразном состоянии. Связь между частицами и молекулами в этих системах осуществляется за счет ван-дер-ваальсовых сил сцепления, через прокладки дисперсионной среды.

Конденсационно-кристаллизационные структуры характеризуются более прочными связями между частицами. Они могут быть образованы за счет удаления дисперсионной фазы из системы при повышении концентрации и охлаждении, что приводит к объединению молекул дисперсионной фазы. При воздействии напряжениями выше предела прочности эти структуры необратимо разрушаются.

В технологических процессах рыбной промышленности обрабатываемое сырье подвергается воздействию рабочих органов машин, т. е. испытывает деформации, вызывающие напряжения. Структурно-механические свойства сырья позволяют установить связь между напряжениями, деформациями и скоростью изменения деформаций в реологических уравнениях. В свою очередь, структурно-механические свойства продукта зависят от типа воздействия на него различных внешних нагрузок. В результате этих внешних воздействий возникают различные напряжения, которые можно классифицировать как *сдвиговые*, *поверхностные* и *объемные*.

При воздействии на продукт сдвиговых касательных напряжений возникают *сдвиговые характеристики*.

На границе раздела продукта с другими материалами выявляются *поверхностные характеристики*. В этом случае могут проявиться касательные напряжения (внешнее трение) и нормальные напряжения (адгезия).

*Объемные характеристики* выявляют характер течения объекта в результате приложения к нему нормальных напряжений в ограниченном пространстве.

Рассмотрение сдвиговых свойств продуктов занимает особое место при изучении течения тел. Параметры сдвиговых характеристик – предельное напряжение сдвига ( $\Theta_0$ ), пластичная вязкость ( $\eta_{пл}$ ), эффективная вязкость ( $\eta_{эф}$ ), плотность ( $\rho$ ) – входят в методики для инженерного расчета процесса течения продукта в промышленных машинах и аппаратах, что позволяет определить затрачиваемые динамические характеристики и выполнить расчет рабочей машины. Все это способствует проведению технологического процесса, обеспечивающего получение готового продукта с заранее заданными свойствами.

Поверхностные характеристики используются при расчетах технологических трубопроводов и другого оборудования, по которому движется обрабатываемая продукция. Поверхности трубопроводов должны создавать наименьшее сопротивление и незначительную адгезию в процессе движения по ним перерабатываемого сырья. К параметрам, необходимым для расчета процесса формования, шприцевания и дозирования упруго-вязко-пластичных продуктов и определяющим компрессионные (или объемные) характеристики, относятся модуль упругости ( $E$ ), напряжение ( $\tau$ ), относительная деформация ( $\epsilon$ ).

### Реологические модели

Многие виды продовольственного сырья и различных полуфабрикатов являются объектами изучения инженерной реологии, которая рассматривает их поведение в различных технологических процессах.

В процессе переработки они растягиваются, сжимаются, сдвигаются, т. е. деформируются, находясь при этом в условиях сложного напряженного состояния. При этом может возникнуть

вопрос: почему же закономерности этого сложного и разнообразного деформирования изучает наука, называемая наукой о течении, т. е. такого рода деформации, при которой частицы деформируемого вещества находятся в условиях сдвига? Различия в поведении исследуемых материалов особенно проявляются при сдвиговых деформациях. И, напротив, в условиях всестороннего равномерного растяжения многие пищевые материалы ведут себя практически одинаково.

На основании вышеизложенного определим и проанализируем основные сдвиговые характеристики исследуемого сырья: предельное напряжение сдвига ( $\Theta_0$ ), пластичную вязкость ( $\eta_{пл}$ ), эффективную вязкость ( $\eta_{эф}$ ), плотность ( $\rho$ ), а также влияние и взаимосвязь между деформацией сдвига  $\gamma$  и касательными напряжениями  $\Theta$ , называемыми «кривые течения». Для описания поведения различных деформируемых и текущих материалов используются три основные условные идеализированные модели: идеально упругого тела (Гукова тела), идеально пластичного тела Сен-Венана и идеально вязкой (ньютоновской) жидкости (рис. 1).

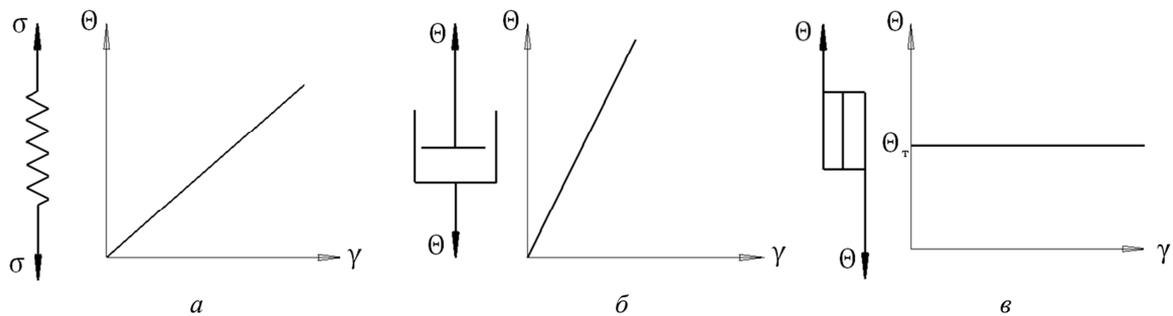


Рис. 1. Реологические модели простых идеализированных тел:  
 а – идеально упругого тела; б – идеально вязкой жидкости; в – идеально пластичного тела

Воздействие напряжениями вызывает проявление упругих, вязких и пластичных свойств у обрабатываемых продуктов.

Если после деформирования продукт полностью восстанавливает свой первоначальный объем и форму, он обладает *упругостью*. При растяжении (сжатии) и сдвиге упругость тел характеризуется модулем упругости первого ( $E$ ) или второго ( $G$ ) рода соответственно. Величины деформации определяются законом Гука:

$$\sigma = \varepsilon E; \Theta = \gamma G,$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение, Па;  $\Theta$  – касательное напряжение, Па;  $\varepsilon$  – линейная деформация;  $\gamma$  – угловая деформация;  $E$  – модуль упругости первого рода, Па;  $G$  – модуль упругости второго рода, Па.

Физическую модель Гукова тела представляет собой пружина (рис. 1, а).

Способность тела под действием внешних сил необратимо деформироваться без нарушения целостности называют *пластичностью*. При величине напряжения, равной пределу текучести  $\Theta = \Theta_\tau$ , начинается пластичное течение. В реологии используется понятие предельного напряжения сдвига ( $\Theta_0$ ), которое соответствует пределу текучести ( $\Theta_\tau$ ).

Реологическую модель пластичного тела можно представить в виде кинематической пары, демонстрирующей трение скольжения (рис. 1, в), а реологической константой является предел текучести ( $\Theta_0$ ).

Если тела оказывают сопротивление относительно смещению их слоев, описываемую способность называют *вязкостью*. Вязкое течение реализуется в истинно-вязких ньютоновских жидкостях при любых сколь угодно малых напряжениях сдвига ( $\Theta$ ). Это течение описывается уравнением Ньютона:

$$\Theta = \eta \dot{\gamma},$$

где  $\dot{\gamma}$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\eta$  – скорость деформации,  $c^{-1}$ ;  $\Theta$  – напряжение сдвига, Па.

Реологическая модель Ньютонова тела в виде поршня с отверстием показана на рис. 1, б.

С помощью различных комбинаций моделей идеальных тел получаем различные уравнения зависимости между приложенными напряжениями и величинами деформаций, описывающими процессы течения реальных пищевых продуктов. Основными сложными моделями являются упруго-пластичное тело; вязко-упругие тела Кельвина – Фойгта и Максвелла; вязко-пластичные тела Бингама, Шведова и Шведова – Бингама (рис. 2).

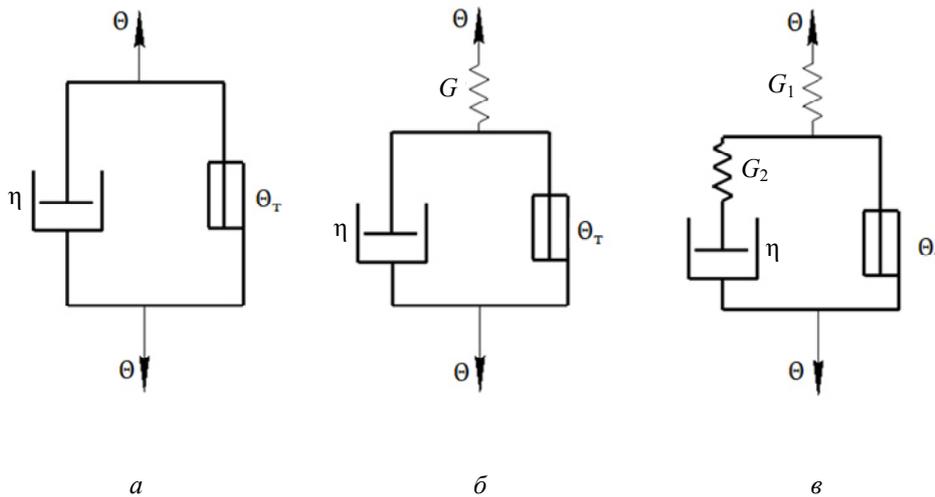


Рис. 2. Вязко-пластичные модели:  
а – Шведова – Бингама; б – Бингама; в – Шведова

Последовательность соединения упругого элемента Гука (модуль упругости  $G$ ) с пластичным элементом Сен-Венана (предел текучести  $\Theta_T$ ) позволяет получить модель упруго-пластичного тела. При  $\Theta < \Theta_T$  наступает упругая деформация тела, при  $\Theta = \Theta_T$  – пластичное течение. График «напряжение сдвига – скорость сдвига», или  $\Theta = f(\dot{\gamma})$ , называют кривой течения, которая является основой реограммы (рис. 3).

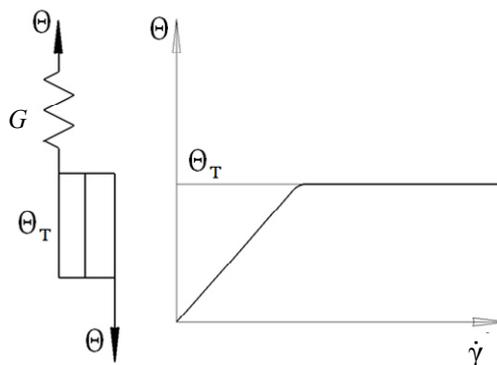


Рис. 3. Модель упруго-пластичного тела и реограмма  $\Theta = f(\dot{\gamma})$

Параллельность соединения упругого элемента Гука с модулем упругости  $G$  и вязкого элемента Ньютона с вязкостью  $\eta$  позволяет получить механическую модель вязко-упругого тела Кельвина – Фойгта (рис. 4).

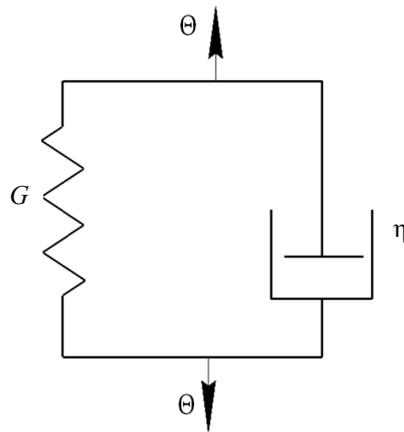


Рис. 4. Модель Кельвина – Фойгта

Вязкое сопротивление жидкости обеспечивает плавность растяжения пружины, но при устранении нагрузки пружина принимает первоначальные размеры в течение определенного времени, задаваемого вязким сопротивлением жидкой среды.

Деформация тела Кельвина – Фойгта является замедленной упругой деформацией. Реологическое уравнение имеет вид

$$\Theta = G\gamma + \eta\dot{\gamma},$$

где  $G$  – модуль упругости при сдвиге, Па;  $\gamma$  – угловая деформация;  $\eta$  – ньютоновская вязкость, Па·с;  $\dot{\gamma}$  – скорость деформации.

Последовательное соединение элементов Гука с модулем упругости  $G$  и ньютоновой вязкостью  $\eta$  есть модель релаксирующего тела Максвелла (рис. 5).

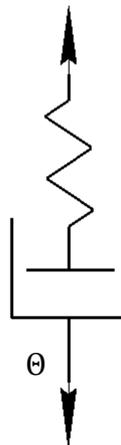


Рис. 5. Модель Максвелла

При воздействии равных напряжений  $\Theta$  тело будет вести себя или как вязкое, или как упругое, что определяется временем релаксации и продолжительностью эксперимента.

Релаксация (затухание, ослабевание) – это уменьшение напряжений при постоянном изменении размеров и формы тела.

Итак, если под действием мгновенного усилия пружина растягивается, а затем сразу нагрузка снята, то поршень не успевает двигаться и система ведет себя как упругое тело. Однако

если поддерживать растяжение пружины постоянным, она постепенно будет релаксировать, перемещая поршень вверх, и система ведет себя почти как ньютоновская жидкость.

Реологическое уравнение имеет вид

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\Theta}}{G} + \frac{\Theta}{\eta}.$$

Двухэлементная механическая модель вязко-пластичного тела Шведова – Бингама состоит из соединенных параллельно элементов Ньютона (вязкость  $\eta$ ) и Сен – Венана (предел текучести  $\Theta_T$ ). Если  $\Theta \geq \Theta_T$ , то тело ведет себя как абсолютно твердое недеформированное. Реологическое уравнение состояния этого тела при  $\Theta > \Theta_T$ :

$$\dot{\gamma} = \frac{\Theta - \Theta_T}{\eta_{пл}}, \text{ или } \Theta = \Theta_T + \dot{\gamma}\eta_{пл}.$$

Эта модель нашла широкое распространение в инженерной практике и позволяет во многих случаях достаточно успешно решать реальные инженерные задачи.

Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвиговых деформаций – реограммы, или «кривые течения», являются характеристиками различных вязко-пластичных и жидкообразных систем, величину которых измеряют специальными измерительными приборами – вискозиметрами. Полученные кривые являются основой выбора математической модели поведения реального тела, что является основной предпосылкой для правильного инженерного расчета производственного процесса.

#### Применение реологических методов в пищевой промышленности

Описать течение различных вязко-пластичных сред (например, конфетных масс, хлебопечкарного и кондитерского теста, измельченных полуфабрикатов из мясо- и рыбопродуктов) возможно с помощью уравнения

$$\Theta = \Theta_0 + v_0^* \dot{\gamma}^n,$$

где  $\Theta$  – напряжение сдвига, Па;  $v_0^*$  – вязкость при единичном значении градиента скорости,  $c^{-1}$ , ( $\dot{\gamma}_1 = 1$ );  $n$  – индекс течения. При этом функция эффективной вязкости имеет вид

$$\eta_{эф} = v_0^* \dot{\gamma}_*^m,$$

где  $\eta_{эф}$  – эффективная вязкость, Па·с;  $\dot{\gamma}_*$  – относительный градиент скорости ( $\dot{\gamma}_* = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1}$  – безразмерная величина);  $m$  – темп разрушения структуры, характеризующий угол наклона линии эффективной вязкости ( $m = 1 - n$ ).

Степенное уравнение является наиболее общим уравнением. Если в этом уравнении  $\Theta_0 = 0$  и  $n = 1$ , оно описывает течение истинно вязкой ньютоновской жидкости ( $\Theta = \eta\dot{\gamma}$ ). При  $\Theta_0 \neq 0$  и  $n = 1$  уравнение соответствует пластично-вязким телам Бингама ( $\Theta = \Theta_m + \dot{\gamma}\eta_{пл}$ ).

Кривые течения степенных жидкостей спрямляются в логарифмических шкалах. Зависимость эффективной вязкости от напряжения или скорости сдвига  $\eta_{эф} = f(\dot{\gamma})$  считают основной характеристикой структурно-механических свойств дисперсных систем (рис. 6).

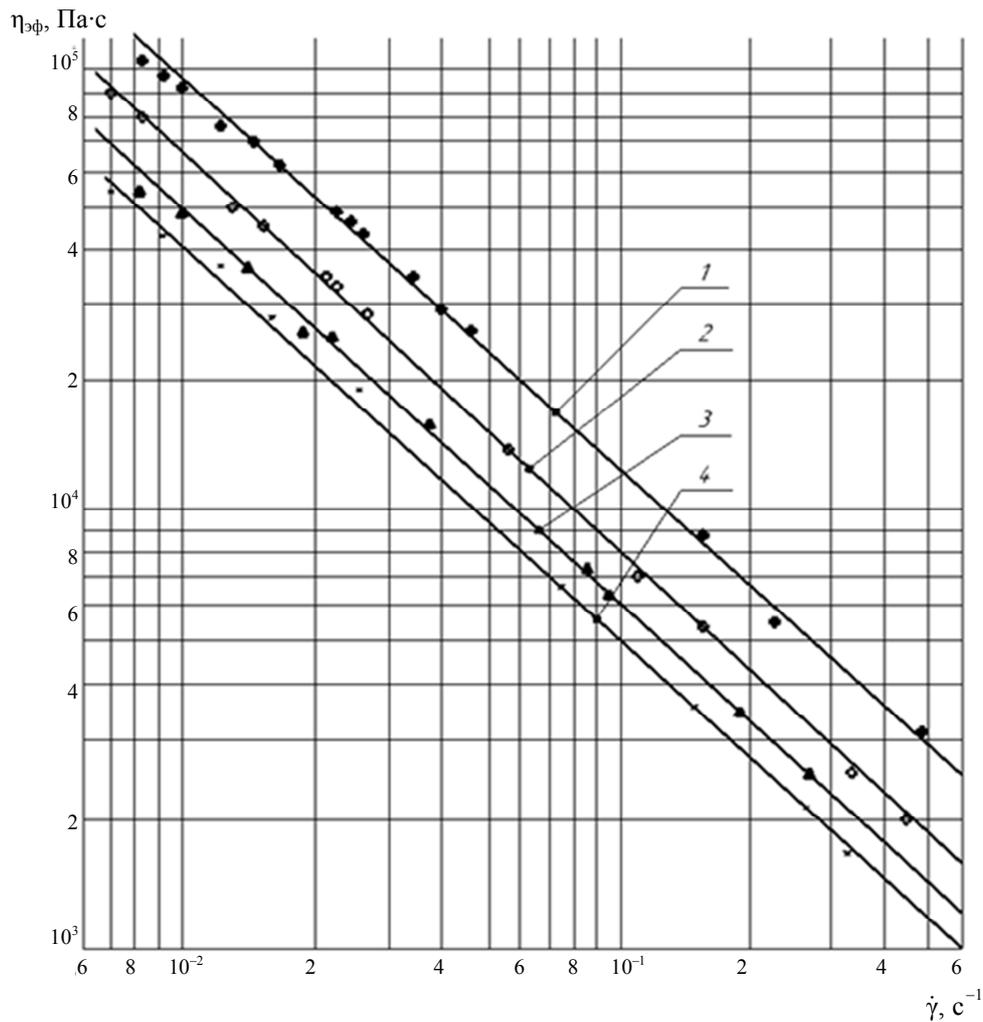


Рис. 6. Зависимость  $\eta_{эф} = f(\dot{\gamma})$  для тефтового фарша сазана при влажности сырья  $w$  (кг/кг):  
 1 – 0,659; 2 – 0,685; 3 – 0,718; 4 – 0,738

Таким образом, предельное напряжение сдвига и вязкость (пластическая, эффективная и пр.) являются наиболее важными сдвиговыми свойствами, которые измеряют приборами, позволяющими определить силу сопротивления внутри материала при относительном смещении его слоев. Результаты экспериментов установлены с помощью вискозиметра РВ-8 и положены в основу методики инженерного расчета технологических машин для перемешивания и транспортировки тефтовых фаршей из частиковых пород рыб.

Для экспериментального определения реологических параметров пищевых продуктов существуют различные методики, позволяющие определять измеряемые величины для различных видов нагрузений (растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб) в лабораторных условиях и в условиях производства.

К лабораторным методам относятся методы ротационной и капиллярной вискозиметрии. Для регулирования технологических параметров процесса используют методы пенетрации.

Следует отметить, что основная цель реометрии – определение какой-либо физической величины материала и ее зависимости от технологических факторов для расчета рабочих органов машин и аппаратов, оценки и управления качеством продукта. В связи с этим изучение структурно-механических свойств в зависимости от температуры, влажности, давления, длительности хранения сырья, степени предварительного механического и теплового воздействия на продукт имеет большую ценность для инженерной практики.

При изучении реальных процессов большое внимание уделено проведению экспериментальных исследований для нахождения эмпирических расчетных зависимостей.

В процессе изготовления кулинарных рыбных изделий из фарша происходит ряд технологических операций. В отдельных случаях в фарш добавляют воду, в частности при куттеровании, при этом происходит ее взаимодействие со всей коллоидной системой в целом, а также с отдельными ее компонентами. Поэтому наибольшую роль при структурообразовании имеют наличие влаги и формы ее связи с белками, соотношение между количеством прочно- и слабосвязанной влаги.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для увеличения водосвязывающей способности к рыбному фаршу добавляют поверхностно активные добавки (поваренную соль, фосфаты, сахар, лимоннокислый натрий, крахмал, ферментные препараты). Влажность фарша зависит от содержания воды в мясе рыбы, ее физиологического состояния, сроков и способов хранения и характера протекания технологического процесса.

Влияние влажности на структурно-механические свойства рыбных кулинарных изделий, содержащих 73 % фарша, исследовали для тефтельных смесей из свежельвовленных сазана, щуки, сома, леща. Компоненты смеси измельчали в волчке с диаметром отверстий решетки 3 мм и перемешивали до получения полной однородности при температуре 292–294 К. Реологические характеристики определяли на ротационном вискозиметре РВ-8. Пробы готовили из каждого продукта для одного образца путем добавления различного количества воды с последующим перемешиванием и термостатированием. Влажность  $w$  каждой пробы смеси определяли методом высушивания до постоянной массы по ГОСТ 13930-68 [1].

Одновременно с этим определяли содержание жира  $\phi$  в пробах фарша методом экстрагирования его из подсушенной навески хлороформом с последующей отгонкой. Фильтраты после выпаривания растворителя высушивали до постоянной массы и рассчитывали по типовой методике. Результаты проведенных исследований приведены в таблице.

Структурно-механические характеристики рыбных фаршей

Основа тефтельного фарша	Влажность, $w$ , кг/кг	Влагосодержание, $U$ , кг/кг	Жирность, $\phi$ %	Реологические характеристики				
				$\Theta_0$ , Па	$\eta$ , Па·с	$\nu$ , Па·с	$\nu_0^*$ , Па·с	$m$
Сом	0,730	2,70	2,86	830	1 278	8,2	1 400	0,917
	0,763	3,22	2,62	760	756	7,3	1 280	0,900
	0,795	3,88	2,31	700	625	7,5	1 260	0,903
	0,828	4,81	2,06	470	485	4,3	760	0,912
Сазан	0,659	1,93	3,05	830	1 600	9,3	1 520	0,900
	0,685	2,17	2,87	610	840	5,7	910	0,918
	0,712	2,47	2,69	460	660	4,7	830	0,909
	0,738	2,82	2,52	400	560	3,7	640	0,890
Лещ	0,718	2,55	2,69	940	6 800	16,8	2 475	0,881
	0,745	2,92	2,51	560	2 300	8,7	1 235	0,880
	0,773	3,40	2,33	520	1 770	7,9	1 155	0,874
	0,801	4,02	2,21	480	1 610	5,0	910	0,890
Щука	0,737	2,80	2,12	740	2 085	6,0	1 020	0,912
	0,766	3,27	1,95	670	1 120	5,8	965	0,900
	0,796	3,90	1,72	500	850	5,1	855	0,919
	0,825	4,71	1,54	460	620	4,1	760	0,904

По полученным значениям структурно-механических характеристик можно судить о реологических свойствах тефтельных рыбных фаршей в широком диапазоне переменных величин. Экспериментальные данные показывают, что с увеличением влажности числовые значения всех сдвиговых характеристик –  $\Theta_0$ ,  $\eta$ ,  $\nu$  – уменьшаются от разрушения, а темп механической структуры  $m$  практически не изменяется. Уменьшение величин реологических характеристик объясняется тем, что происходит утолщение жидкостных прослоек между частицами продукта. Это приводит к понижению концентрации белков в растворе и уменьшению вязкости. Однако с увеличением времени проведения измерения происходит загустевание фарша, что является отличительной особенностью рыбного сырья.

### Заключение

Приведенные реологические методы, вышеперечисленные зависимости на примере рыбного фарша являются основой для создания методик инженерных расчетов, которые связывают геометрические размеры устройств с кинематическими и динамическими параметрами потока и учитывают реологические свойства перерабатываемых продуктов, отличных от рыбного фарша составов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 13930-68. Рыба, морские млекопитающие, беспозвоночные, водоросли и продукты их переработки. Методы определения содержания влаги. М., 1969. 87 с.
2. Горбатов А. В., Щукин В. М. К теории ротационной вискозиметрии. Известия вузов СССР // Пищевая технология. 1980. № 6. С. 108–113.
3. Крутоголов В. Д., Кулаков М. И. Ротационные вискозиметры. М.: Машиностроение, 1984. 112 с.
4. Маслов А. М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей. Л.: Машиностроение, 1980. 208 с.
5. Проселков В. Г., Самусенко Ю. В. О практическом использовании ротационной вискозиметрии при исследовании реологических характеристик рыбных фаршей. М.: Изд-во ЦНИИТЭИРХ, 1983. 15 с.

Статья поступила в редакцию 17.01.2019

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Коган Виктор Владимирович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры материаловедения и технологии сварки; kvv0403@mail.ru.

**Семенова Лариса Эдуардовна** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры электротехники, электроники и автоматики; lzdoma41@mail.ru.



### ENGINEERING RHEOLOGY IN FOOD INDUSTRY

**V. V. Kogan, L. E. Semenova**

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The paper describes the technological processes of the food industry assuring production of a finished product with predetermined properties, where different types of food raw materials and semi-finished products are objects of study of engineering rheology, considering their behavior at the stage of deformation (compression, twisting, stretching). The processes of mixing and inter-operational transportation of products are interrelated with the viscous-plastic raw materials (dough, minced meat, candy mass) contacting with the working parts of machines. That is why, in order to rationally use and save material resources the selection of process parameters and operating modes should be carried out subject to the rheological properties of the products (shearing, surface, volumetric). These properties have been listed and their nature has been described. The basic shearing characteristics of the raw materials under study have been determined and analyzed. Specific features of the elastic, viscous and plastic properties of the product under stress are considered. The combinations of rheological models of simple idealized bodies are studied: viscous-plastic, elastic-plastic. Equations that describe the flow of various viscous-plastic media are given. The dependence of the effective viscosity on the stress or shear rate for meatball meat from fish is graphically presented. The effect of minced meat humidity on the structural and mechanical properties of meatballs from fresh carp, pike, catfish, and bream has been traced. Rheological characteristics were determined by a rotational viscometer RV-8. Samples were prepared for one specimen from each product by adding a different amount of water, followed by stirring and thermostating. In parallel, the fat content was determined. According to the obtained values of structural and mechanical characteristics, the rheological properties of meatballs have been illustrated in a wide range of variables. From the data obtained it can be inferred that with increasing humidity, the numerical

values of all shearing characteristics decrease due to thickening of the liquid interlayers between the product particles, and the rate of the mechanical structure remains practically unchanged.

**Key words:** rheology, food products, raw materials, structure, deformation, stress, elasticity, plasticity, viscosity, minced fish, viscosimetry.

**For citation:** Kogan V. V., Semenova L. E. Engineering rheology in food industry. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2019;4:147-156. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-5529-2019-4-147-156.

#### REFERENCES

1. GOST 13930-68. *Ryba, morskie mlekopitaiushchie, bespozvonochnye, vodorosli i produkty ikh pererabotki. Metody opredeleniia soderzhaniia vlagi* [GOST 13930-68. Fish, sea mammals, invertebrates, algae and their processed products. Moisture Determination Methods]. Moscow, 1969. 87 p.
2. Gorbатов А. В., Шчукин В. М. К теории ротационной вискозиметрии. *Izvestiia vuzov SSSR* [To theory of rotational viscometry. Proceedings of universities of the USSR]. *Pishchevaia tekhnologiya*, 1980, no. 6, pp. 108-113.
3. Krutogolov V. D., Kulakov M. I. *Rotatsionnye viskozimetry* [Rotational viscometers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 112 p.
4. Maslov A. M. *Apparaty dlia termoobrabotki vysokoviazkikh zhidkosti* [Apparatus for heat temperature processing of highly viscous liquids]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980. 208 p.
5. Proselkov V. G., Samusenko Iu. V. *O prakticheskom ispol'zovanii rotatsionnoi viskozimetrii pri issledovanii reologicheskikh kharakteristik rybnykh farshei* [On practical use of rotational viscometry in studying rheological characteristics of minced fish]. Moscow, Izd-vo TSNIITEHIRKh, 1983. 15 p.

The article submitted to the editors 17.01.2019

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kogan Viktor Vladimirovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Materials Science and Technology of Welding; kvv0403@mail.ru.

**Semenova Larisa Eduardovna** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering, Electronics and Automation; Izdoma41@mail.ru.

