

Биологические методы и приборы для контроля процессов приготовления колбасных фаршей

В.М. Горбатов - Всесоюзный научно-исследовательский институт мясной промышленности
 В.Д. Горбатов, А.В. Горбатов - Московский технологический институт мясной и молочной промышленности, СССР, г.Москва

Интенсификация и автоматизация производства и повышения качества продукции необходимы для объективного и оперативного контроля качества сырья на различных стадиях обработки. Отсутствие в промышленности таких приборов тормозит внедрение в практику автоматизированных линий производства колбасных изделий.

Мясные продукты необычайно сложны по своему составу и обладают комплексом различных свойств, представляющих в совокупности качество продукции. Существующие методы оценки качества мясных продуктов весьма субъективны.

Более полное представление о качестве мясных продуктов может дать только та группа физических свойств, которая проявляет зависимость от биологического и химического состава и определяется внутренним строением продукта, т.е. его структурой. Приборы (I) должны быть такими, которые позволяют измерять небольшие изменения качественных характеристик соответствовали большим изменениям структуры прибора. Решение такой проблемы, учитывая многообразие и взаимосвязь факторов, характеризующих качество продукции, представляет собой сложную научно-техническую задачу. Но даже промежуточное решение частных задач будут полезны промышленности.

Оценку характеристик качества колбасных фаршей может служить их консистенция. В настоящее время оценка консистенции является субъективной, т.е. зависящей от индивидуальных особенностей дегустаторов и операторов. Для объективной оценки консистенции необходим инструментальный метод ее измерения. Консистенция может быть выражена или в условных единицах - степени пенетрации, или комплексом сдвиговых (предельное напряжение сдвига, эффективная вязкость) и поверхностных (липкость, трение) структурно-механических свойств. Из этих свойств предельное напряжение сдвига достаточно чувствительно к изменению технологических и механических факторов и может быть измерено сравнительно быстро и точно. Таким образом, этот показатель можно использовать для технологической оценки фарша в процессе его изготовления.

Разработка реологических приборов в наших лабораториях проводят в трех направлениях: универсальные - для научно-исследовательских целей; производственные - для поэтапного контроля качества с оперативной обратной связью к обрабатывающей машине. Две последние группы приборов наиболее перспективны для промышленности (2,3).

Второй группе приборов - производственным, можно отнести конические пластометры и пенетрометры. Они позволяют определить консистенцию мясных продуктов по предельному напряжению сдвига или по относительной величине - степени пенетрации (экспресс-методом). При измерениях предельного напряжения сдвига в СССР используют конический пластометр КП-3, который дает ошибки при измерениях из-за отсутствия точной фиксации точки соприкосновения конуса с исследуемым продуктом. В пенетрометрах АР-4/1, АР-4/2, выпускаемых в ГДР, для увеличения точности фиксации конуса с продуктом имеется микроскоп, что усложняет и утяжеляет конструкцию и усложняет процесс измерения. Приборы имеют массу 13-18 кг и не являются переносными.

Для определения предельного напряжения сдвига различных вязко-пластичных пищевых продуктов предложено несколько модификаций полуавтоматических перетрометров. В приборах устранены недостатки конического пластометра КП-3 и других пенетрометров. Перемещение индентора осуществляется плавно за счет того, что шток индентора соединен с поршнем; последний помещен в полный цилиндр, играющий роль демпфера. Механизм, регистрирующий перемещение конуса, устройство, которое обеспечивает автоматическую фиксацию точки соприкосновения индентора с исследуемым продуктом.

Модификация полуавтоматического пластометра ПП-1 (А. с. № 623153, б.и., 1976, № 33) имеет механизм, регистрирующий перемещение конуса, представляет собой два соосно установленных индентора, один из которых свободно вращается в подшипниках, а другой соединен через зубчатый механизм с рычагом. При перемещении конуса диски благодаря трению к фрикционному ролику, приводятся в движение посредством рычага. Во время контакта конуса с исследуемым электропроводным продуктом свободно вращающийся диск. Смещение одного диска относительно другого показывает глубину перемещения конуса в продукт. Таким образом прибор состоит из трех основных механизмов: регистрирующего, регистрирующего и тормозного (2).

При котором наступает равенство сил тяжести подвижной части прибора и сил сопротивления мясных продуктов, принимают равным 180 секундам. Замеряемая при этом глубина погружения индентора позволяет рассчитать предельное напряжение сдвига продуктов. При этом масса подвижной части прибора и геометрической форме индентора показания прибора могут быть выражены в конкретной величине - предельное напряжение сдвига (Па). Однако для точности замера не всегда позволяет вмешиваться в технологические процессы, так как длительность некоторых из них (тонкое измельчение, перемешивание) составляет всего 180-400 секунд.

Таким образом для производственных целей прибор, работающий в режиме измерения значения предельного напряжения сдвига, не всегда пригоден, т.е. мало эффективен. Поэтому разработан экспресс-метод, обеспечивающий определение консистенции за несколько секунд. Для этого выбрана относительная величина - степень пенетрации. Под пенетрацией понимают проникновение тела определенной формы и размера с постоянной нагрузкой в исследуемый продукт. Проникновение на заданную глубину происходит за счет мгновенных деформаций. Для выполнения предельного напряжения сдвига при измерении пенетрации было разработано устройство ПП-2 (а.с. № 690380 б.и., 1979, № 37).

Устройство снабжено источником питания и преобразователем перемещения штока с индентором в электрический сигнал. Преобразователь состоит из двух коаксиально-цилиндрических металлических стаканов, установленных один над другим. Верхний стакан соединен жестко со штоком и подключен к источнику, представляющему собой генератор электрических колебаний.

Нижний стакан установлен неподвижно и через усилитель подключен к вторичному самопишущему прибору. При определении напряжения сдвига и снятия кинетики погружения индентора в продукт устойчиво устанавливают на предварительно выровненную поверхность исследуемого продукта. Точку соприкосновения индентора с исследуемым продуктом устанавливают вручную, фиксируется лампочкой при помощи электрической схемы. После чего выключателем подают напряжение на генератор, усилитель и электромагнитную защелку, которая освобождает шток, входя из зацепления с ним. Шток с индентором благодаря собственной силе тяжести начинает погружаться в исследуемый продукт. Так как верхний стакан соединен жестко со штоком, при перемещении его относительно нижнего стакана образуется переменная электрическая емкость, увеличивающаяся по мере погружения индентора, что фиксируется вторичным прибором. Начальная емкость, образованная стаканами, компенсируется в схеме усилителя. По окончании замера устройство обесточивают, а шток выводят в верхнее положение, фиксируемое электромагнитной защелкой.

На приборе было проведено в производственных условиях более 200 опытов с записью кинетических кривых процесса внедрения конуса в различные виды фаршей. Анализ кривых показал, что в среднем 75% глубины внедрения конуса происходит за время 5 секунд. Следовательно, модернизация прибора, обеспечивающая измерение консистенции фарша на производстве, должна быть направлена на создание условий при которых происходит точное, стабильное и автоматическое измерение пятисекундного интервала и глубины погружения конуса (коэффициента пенетрации) за это время.

Установлено, что измерение консистенции как величины предельного давления готовых изделий с помощью конусного индентора дает существенные ошибки. Поэтому для измерения консистенции готовых изделий разработано и исследовано ряд иглообразных инденторов. Результатами их исследований установлено, что при незначительных нагрузках игла достаточно глубоко внедряется в продукт. Консистенция продукта определенная по глубине погружения иглы, хорошо согласуется с результатами измерения, выполненными другими методами. При тщательном приготовлении фарша отклонения измеряемых величин от средних значений составляют 5%. Для получения усредненных показаний консистенции производственных композиций различных видов готовых колбасных изделий применены четырехиглообразные инденторы.

Рассмотренные приборы не являются универсальными. Для промышленности необходим универсальный прибор, позволяющий контролировать и регулировать консистенцию фарша и готовых изделий из него. К прибору предъявляют следующие требования:

- иметь повышенную точность измерения глубины и длительности пенетрации;
- быть простым в обслуживании, компактным, легким, переносным для использования его на различных этапах технологического процесса производства колбасных изделий;
- быть простым по конструкции и надежным в работе, устойчивым к повышенной влажности, вбириции и т.д.;

Разработанная третья Ш-3 (а.с. № 731373, б.и. 1980 № 16) и четвертая Ш-4 (а.с. № 822022, б.и. 1981 № 15) модификации полуавтоматического пенетromетра удовлетворяют приведенным требованиям. Отличительной особенностью третьей модификации пенетromетра по сравнению с первой является наличие реле времени и повышение точности измерения благодаря замене механической части (диск-ролик-диск и зубчатой передачи) на электромагнитную систему. Пенетromетр Ш-4 является универсальным и позволяет замерять предельное напряжение сдвига и степень пенетрации, как электропроводящих, так и не электропроводящих продуктов. Он снабжен блоком управления с реле времени, тормозным механизмом с диском и электромагнитом фиксации измерения для определения коэффициента пенетрации. Прибор имеет равномерную шкалу отсчета. Механизм регистрации перемещения индентора связан посредством соединенных между собой шкивов тросика и стержня со штоком. Тормозной блок соосно расположен со шкивом механизма регистрации. При автоматической фиксации момента соприкосновения индентора с продуктом, тормозное устройство, которое гасит инерцию подвижной части прибора.

Предлагаемые нами приборы - полуавтоматические пенетromетры позволяют контролировать качество как готовых изделий, так и фаршей на различных стадиях технологической обработки экспресс-методом.

Структурно-механические свойства колбасного фарша и готовой продукции из него взаимосвязаны и определяются, в значительной мере, процессом приготовления фарша (куттерование). Структурно-механические и технологические характеристики фарша и готовых изделий, соответствующие оптимальной продолжительности измельчения при оптимальном влагосодержании называются "эталонными" (3). Для широкого использования "эталонных" показателей в промышленности необходимы приборы, позволяющие объективно контролировать качество продуктов (по структурно-механическим свойствам) в процессе их изготовления с возможностью применения обратной связи с технологическим оборудованием.

Для выполнения поставленной задачи разработаны капиллярные и сдвиговые устройства для определения структурно-механических свойств колбасного фарша в потоке с наличием обратной связи к обрабатываемой машине.

Капиллярные устройства мостового или сифонного типа позволяют использовать их для любого типа измельчителей и дают возможность путем непрерывного измерения структурно-механических свойств автоматически регулировать весь процесс измельчения. В сифонном устройстве (а.с. № 370524, б.и. 1973, № II, а.с. № 688868, б.и. 1979, № 36) указанная цель достигается тем, что фарш во время измельчения пропускается через горизонтальную трубку, имеющую по краям упругие элементы-пружины, сифоны и т.д. Благодаря возникающему усилию за счет трения между слоями движущегося фарша, трубка совершает движение вдоль продольной оси. Величина перемещения измеряется чувствительным датчиком и передается регистрирующему и регулирующему приборам.

В устройстве, работающем по принципу "моста" при протекании продукта через трубки различного сечения возникает перепад давления (разбаланс моста). Если меняются структурно-механические свойства, то изменяется перепад давления, который регистрируется прибором (а.с. № 368506, б.и. 1973, № 9), специально разработанными для этой цели. При наличии обратной связи этот прибор, также как и предыдущий, может регулировать консистенцию фарша.

теория капиллярной вискозиметрии основывается на том, что поток в приборе ламинарный, напряжение на стенке отсутствует, скорость сдвига в точке зависит от напряжения. Условия равномерного прямолинейного движения выделенного в жидкости цилиндра радиусом r и длиной l , определяется равенством движущей силы - силы давления, приложенной к его торцам: $p\pi r^2$ где p - перепад давления на торцах цилиндра) равенства вязкого сопротивления, приложенной к его боковой поверхности: $2\pi r l \theta$ Из получаемого равенства напряжения на боковой поверхности выделенного цилиндра $\theta = \frac{p}{2l} \cdot r$ (1). Из уравнения (1) видно, что напряжение на оси трубки равно нулю, а на ее стенке θ_c при радиусе R тогда $\theta = \theta_c \frac{r}{R}$ (3)

представим истинный градиент скорости $\frac{du(r)}{dr}$, где $u(r)$ - скорость слоя радиусом r , в виде функции напряжения сдвига $\dot{\epsilon}(\theta)$; $-\frac{du(r)}{dr} = \dot{\epsilon}(\theta)$ где знак "минус" показывает, что скорость с увеличением радиуса уменьшается. Интегрирование в пределах от r до R дает $-\int_r^R \dot{\epsilon}(\theta) dr = u(r) - u(R)$

поскольку проскальзывание отсутствует, то $u(R) = 0$. Расход жидкости dV через элементарный слой dz определяется выражением $dV_c = 2\pi r u(r) dz$. Подставляя вместо скорости слоя ее значение и интегрируя по частям, получаем расход жидкости во всей трубе $V_c = \pi \int_0^R r^2 \dot{\epsilon}(\theta) dz$ формулу (3) получаем $r = \frac{\theta_c}{\theta} R$; $dr = -\frac{\theta_c}{\theta^2} d\theta$. Тогда последнее выражение легко представить в общем виде: $\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \cdot \dot{\epsilon}(\theta) d\theta$ (4)

для ньютоновской жидкости $\dot{\epsilon}(\theta) = \frac{\theta}{\eta}$ элементарное интегрирование уравнения (4) позволяет получить уравнение Пуазейля: $\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{\theta_c}{\eta}$ или $\theta_c = \eta \frac{4V_c}{\pi R^3} = \eta \frac{32V_c}{\pi d^3}$ (5) где V_c в виду, что расход $V_c = \pi R^2 w$ и среднеобъемная скорость w (м/с) связаны соотношением $V_c = \pi R^2 w = \frac{\pi d^2}{4} w$, где τ - продолжительность протекания объема V , получаем $\theta_c = \eta \frac{4V_c}{\pi R^3} = \eta \frac{8w}{d^2}$ в этих выражениях по аналогии с законом вязкого сопротивления Ньютона $\theta_c = pR/2l$ - консистентная переменная - "напряжение сдвига" $\dot{\epsilon} = 32V_c/\pi d^3 = 8w/d^2$ - консистентная переменная "градиент скорости".

относительно к теории капиллярной вискозиметрии уравнение Пуазейля (5) можно записать в следующем виде: $\tau = \eta \dot{\epsilon}^n$ для интегрировании общего уравнения (4) для стеновой жидкости $\dot{\epsilon}(\theta) = \left(\frac{\theta}{B_0^* \dot{\epsilon}_1^{1-n}}\right)^{1/n}$ где $\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \left(\frac{\theta}{B_0^* \dot{\epsilon}_1^{1-n}}\right)^{1/n} d\theta = \frac{4n}{3n+1} \left(\frac{\theta_c}{B_0^* \dot{\epsilon}_1^{1-n}}\right)^{1/n}$ (6)

где $\dot{\epsilon}_1^*$ - эффективная вязкость (Па·с) при единичном значении градиента скорости $\dot{\epsilon}_1 = 1 \text{ с}^{-1}$. более эту исходную зависимость можно представить в нескольких вариантах: решить относительно расхода напряжения или перепада давления. Для теории капиллярной вискозиметрии представим уравнение (6) в консистентных переменных: $\theta_c = B_0^* \dot{\epsilon}_1 \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n \left(\frac{8w}{\dot{\epsilon}_1 d}\right)^n$ или $\theta_c = A_1 \dot{\epsilon}_1^n$ (7) где $A_1 = B_0^* \dot{\epsilon}_1 \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n$ - напряжение сдвига на стенке трубы при единичном значении относительного среднего градиента скорости $\dot{\epsilon}_1$; $\dot{\epsilon}_1^* = 8w/\dot{\epsilon}_1 d$ - относительный средний градиент скорости (консистентная переменная); $n = \frac{2[\lg(\rho d/4\eta)]}{\lg(\rho d/8w/\dot{\epsilon}_1 d)}$ - индекс течения; если в логарифмических шкалах экспериментальная кривая спрямляется, то он равен отношению логарифмов консистентных переменных из экспериментов, отложив экспериментальные точки в логарифмических шкалах и проведя прямую линию по формуле (7) легко определить A_1 и n , а далее вычислить вязкость $B_0^* = A_1 \dot{\epsilon}_1^{-1} \left(\frac{4n}{3n+1}\right)^n = A_1 \dot{\epsilon}_1^{-1} f_4(n)$ (8)

где $f_4(n) = \left(\frac{4n}{3n+1}\right)^n$ - функция индекса течения (она для облегчения расчетов построена на рис. 1а. в частном случае для ньютоновской жидкости при индексе течения, равном единице, формулы (7) и (8) превращаются в уравнение Пуазейля (5). Уравнение (7) можно представить так же как напряжение сдвига на стенке в зависимости от истинного относительного градиента скорости: $\dot{\epsilon}_1^* \theta_c = \frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8w}{\dot{\epsilon}_1 d}$ т.е. в виде $\theta_c = (B_0^* \dot{\epsilon}_1) \dot{\epsilon}_1^*$ и см.

для облегчения расчетов на рис. 1б построена функция $f_5(n, \dot{\epsilon}_1) = \left(\frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8w}{\dot{\epsilon}_1 d}\right)^n$ (8a) Индекс течения в дифференциальном уравнении течения и в консистентных переменных, если в логарифмических шкалах получается прямая линия, одинаков. В общем случае для двух названных уравнений индекс течения может отличаться. Тогда по формуле (7) будет определен n' и истинный градиент скорости по стенке: $\left(\frac{du}{dr}\right)_c = \frac{3n'+1}{4n'} \cdot \frac{8w}{d}$

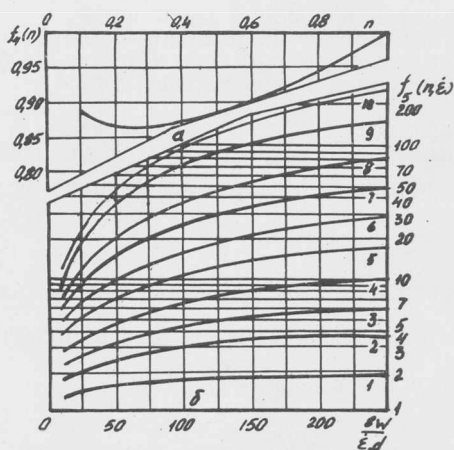


Рис.1. Графики для определения функций течения в капиллярных вискозиметрах: "а" - функция индекса течения по формуле 8; "б" - функция индекса течения и среднего градиента скорости по формуле 8а в зависимости от числовых значений градиента скорости при различных индексах течения 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0.

Fig.1. Graphs to determine flow functions in capillary viscosimeters: a - flow index function by Formula 8; b - flow index function & mean velocity gradient by Formula 8a as related to the numerical values of velocity gradients at various flow indices 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0.

В дифференциальное уравнение $\theta = B \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^n$ (B, n - коэффициент пропорциональности эффективной вязкости (Па сⁿ), при единичном значении градиента скорости $\xi = 1, c^{-1}$) входит известный индекс течения n , который со средним связан следующими соотношениями:

$$n = \frac{\partial(\ln \theta_c)}{\partial[\ln(3n'+1) \cdot \frac{\partial u}{\partial z}]} = \frac{n'}{1 - \frac{1}{3n'+1} \frac{\partial u}{\partial z}}$$

$$\text{или } \frac{1}{n} = \frac{1}{n'} + \frac{4n' \frac{\partial u}{\partial z}}{\partial(\ln \theta_c)} \quad (9)$$

Вопрос о равенстве индексов течения или изменения того или иного его значения решается экспериментально. При постоянных индексах течения кривые течения имеют одинаковую форму, но будут раздвинуты по оси градиентов скорости пропорционально значению $(3n+1)/4n$. Методика измерения сдвиговых свойств для большинства приборов этого типа подобна. Сдвиговые устройства также предназначены для определения комплекса структурно-механических свойств колбасного фарша в процессе куттерования, а также для автоматического формирования оптимальной степени измельчения. В ИТИИИе разработан по принципу скольжения пластины по продукту ряд устройств. Устройство (а.с. № 578617, б.и. 1977, № 40) (4) состоит из корпуса, включающего неподвижную и подвижную (ползун) части. На неподвижной части укреплен рама с роликом и пружина, связанная с кронштейном. Внутри рамы установлена катушка с первичной и вторичными встречно включенными обмотками. Подключение вторичной обмотки необходимо для компенсации начальной ЭДС при отсутствии внешней нагрузки. Подвижная часть корпуса имеет рифления для контакта с исследуемым продуктом и содержит нагревательные элементы, поддерживающие постоянную температуру в месте контакта. Работает устройство следующим образом: при определении структурно-механических свойств фарша устройство располагают в куттере, таким образом, чтобы рифления соприкасались с исследуемым продуктом; при движении продукт воздействует на рифления подвижной части корпуса и перемещает его относительно неподвижной части. Сердечник, перемещаясь в катушке, меняет ЭДС вторичных обмоток, что фиксируется приборами. Устройство позволяет регулировать силу контактирования с продуктом, что изменяет величину адгезии. Контроль может осуществляться в течение всей технологической операции (куттерование, перемешивание) или периодически. При использовании автоматического потенциометра в качестве контрольного прибора, возможно фиксирование измерений структурно-механических свойств исследуемого фарша во времени, а применение потенциометра с контрольной стрелкой позволит автоматически определить оптимальную степень измельчения фарша (а.с. № 737832, б.и. 1980, № 26). В процессе измельчения различия реологических свойств фарша проходят через максимум, достигнув минимума показания регистрирующем приборе начинают уменьшаться. При этом сигнальная цепь блока управления замыкается. Кроме того, в ИТИИИе разработано устройство (а.с. № 773489, б.и. 1980, № 39), позволяющее автоматически фиксировать оптимальную степень измельчения без вторичного прибора. Данное устройство является простым по конструкции, компактным и надежным в работе. Таким образом, принцип работы рассмотренных устройств основан на измерении усилий, которые возникают при перемещении ползуна по поверхности фарша. Для теоретического определения усилий предполагаем, что ползун - абсолютно жесткое тело, а фарш - упруго-вязкая среда. Фарш вращается с угловой скоростью ω ($\omega = \frac{n \cdot 2\pi}{60}$), где n - об/мин. Ползун находится на расстоянии Z от центра вращения. Скорость перемещения ползуна относительно фарша равна $w = \omega \cdot Z$. При больших угловых скоростях перемещение ползуна по фаршу может происходить путем проскальзывания, за счет малой величины адгезии. Если же сила адгезии большая, то возможно нарушение сплошности фарша, т.е. ползун тащит за собой прилипшие куски фарша. В этом случае происходит проскальзывание фарша по фаршу. Если же адгезия большая, а скорость перемещения ползуна мала, то не происходит нарушения сплошности среды. Последнее состояние берем за основу при рассмотрении равновесия элемента (4). Предварительные исследования показали, что предельное напряжение сдвига фарша, выраженное в Паскалях и определенное на ротационных вискозиметрах и конических пластометрах хорошо коррелируется с линейными перемещениями ползуна, а следовательно и с расчетными усилиями. Поэтому данные устройства являются теоретически обоснованными и могут найти применение в промышленности. Таким образом, разработка комплекса приборов позволила определить в лабораторных и производственных условиях оптимальные параметры на каждом технологическом этапе колбасного производства. Приборы дают возможность контролировать и автоматически регулировать величину структурно-механических свойств фарша в производственных условиях, что создает предпосылки для создания автоматической системы управления качеством.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов, - М.: Пищевая промышленность, 1979, 373 с.
2. Косой В.Д. Определение предельного напряжения сдвига бесшпигового колбасного фарша для оценки качества готовых изделий. - Мясная индустрия СССР, 1978, № 4, с.26-32.
3. Горбатов А.В., Горбатов В.М., Косой В.Д. Эталонные характеристики колбасных фаршей. XIII Европейский конгресс научных работников мясной промышленности. - М.: Пищевая промышленность, 1980, с.401-406.
4. Исследование устройства для определения консистенции колбасного фарша при куттеровании. - А.В. Горбатов, В.Д. Косой, Шукин В.М., Звонов О.В. Мясная индустрия СССР, 1980 № 10, с.31-34.