

Прибор для определения гранулометрического состава зерна с помощью седиментометрического анализа

К. С. ЧАКЕЕВА¹, Г. С. МУХАНОВА¹, М. Б. ТЫШКАНБАЕВА²,
А. У. КАЛИЖАНОВА², А. СЕЙДАХМЕТОВ³

¹Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан

²Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

³Университет НАРХОЗ, Алматы, Республика Казахстан, e-mail: gulmirasamudin@gmail.com

Описан принцип седиментационного анализа для определения гранулометрического состава зерна. Представлена конструкция и электрическая схема седиментометрического прибора, в котором зёрна распределяются в зависимости от скорости движения в жидкости и измеряется их электрическое сопротивление в процессе осаждения. Перечислены преимущества использования метода измерения электропроводности по сравнению с традиционным гравиметрическим (весовым) методом.

Ключевые слова: гранулометрический состав, седиментационный анализ, измерение электропроводности.

The principle of sedimentation analysis to determine the grain-size composition is described. The construction and electrical scheme of the sedimentometric device, in which the determination of the sediment is carried out via its electrical conductivity are presented. The advantages of using conductivity measurements are compared to conventional gravimetric method.

Key words: grain-size composition, sedimentation analysis, electrical-conductivity measurement.

Гранулометрический состав перерабатываемого зерна пшеницы влияет на выбор характеристик технологических процессов на мукомольно-крупяном и комбикормовом заводах. Выбор режимов технологических схем, процессов и аппаратов мукомольного, крупяного и комбикормового производств, таких как сепарирование, увлажнение, сушка, измельчение и другие зависит от геометрических характеристик зерна, определяющих его свойства. Геометрические характеристики зерна обусловлены его физическим строением и химическим составом. В [1, 2] приведён целый ряд показателей, связанных с определением фракционного состава или распределением по размерам зёрен и гранул: линейные размеры и форма; плотность укладки; особенности транспортировки; выравненность, связанная с функцией распределения по размерам и др. Контроль крупности зерна осуществляется, как правило, методом анализа на двух ситах. Отверстия сита выполняют по максимальному сечению зерна, что увеличивает длительность просеивания и снижает точность определения технологических параметров [3].

При ситовом анализе невозможно получить непрерывную функцию распределения зёрен, так как набор размеров сит редкий, а время выполнения анализа продолжительно. Метод ситового анализа отличается достаточной простотой, доступностью и надёжностью, широко используется в заводской и лабораторной практике. Минимальная масса пробы определяется размерами наиболее крупных зёрен, например, для зёрен размерами 0,1; 0,3; 0,5; 1; 3; 5–10 мм минимальная масса пробы составляет соответственно 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 2,25–18 кг. Наиболее распространён просев сухих проб.

Более точные оптические методы, микроскопические и

другие требуют ещё большего времени.

Использование седиментационного метода для определения крупности (линейных размеров) зерна является новым и перспективным, в отличие от широко применяемых методов биохимии и молекулярной биологии для определения дисперсного состава измельчённых материалов, почв и грунтов, промышленной пыли. Это связано с физико-химическим взаимодействием зерна и воды, затрудняющим проведение анализа в стандартных условиях и требующим разработки специфических методов и технических средств, однако представляется реальным.

Линейные размеры и форму зерна, характеризующие гранулометрический состав зерна, а также метод их измерения необходимо подбирать с учётом целей технологического процесса. В частности, для контроля процессов, протекающих в жидкой среде, предпочтительнее использовать седиментационный анализ, который позволяет непосредственно регистрировать гранулометрическую характеристику как непрерывную функцию.

Выбор седиментационного анализа для создания автоматического датчика объясняется рядом преимуществ:

совпадение поведения зёрен в измеряемых технологических процессах, таких как сепарирование, шелушение, увлажнение, сушка, измельчение и др.;

измерение непрерывной функции распределения зёрен по размерам и удобство варьирования формы выдачи информации о гранулометрическом составе;

отсутствие длительной и трудоёмкой сушки пробы.

В седиментационном анализе распределение зёрен по размерам устанавливается определением скорости падения зёрен в жидкости без непосредственного разделения про-

бы. Считается, что седиментационный анализ пригоден для определения зёрен в диапазоне размеров 0,5–100 мкм [4, 5].

В настоящей работе описан принцип седиментационного анализа, конструкция и электрическая схема седиментометрического прибора для определения гранулометрического состава зерна.

Принцип седиментационного анализа для определения гранулометрического состава зерна. Рассмотрим седиментационный анализ, позволяющий получить гранулометрические характеристики зёрен и их распределение по размерам.

Зерно – сложное тело, состоящее из биополимеров, которые по структуре являются капиллярно-пористыми телами, а по природе – коллоидами. Стенки капилляров эластичны и при поглощении жидкости набухают, а при высушивании дают усадку и становятся хрупкими. Для придания зерну оптимальных технологических свойств используется гидротермическая обработка, т. е. воздействие на зерно водой и теплом.

Седиментационный метод определения гранулометрического состава зерна можно применять на любой стадии гидротермической обработки, т. е. в любой точке кинетической кривой увлажнения или сушки, что может быть использовано для косвенных измерений ряда свойств зерна – стекловидности, содержания клейковины и других свойств, зависящих от структуры и геометрических размеров.

Наличие капельножидкой влаги между зёрнами пробы и на поверхности зёрен слабо влияет на скорость осаждения, так как смешивается со средой падения. Проникновение

влаги во внутренние слои зерна за время (секунды) падения несущественно, так как время увлажнения зерна составляет часы и достигает трёх суток.

При изучении гранулометрического состава зерна используют понятие эквивалентного диаметра, позволяющего описывать частицы неправильной формы. Эквивалентный диаметр определяется как диаметр шара объёмом, равным объёму среднего зерна:

$$d_s = \sqrt[3]{6V/\pi},$$

где $V = G/(n\rho_s)$ – объём среднего зерна; G – масса произвольной навески; n – число зёрен в навеске; ρ_s – средняя плотность зёрен.

Для седиментационного анализа необходимо установить зависимость между размером зёрен и скоростью осаждения их в жидкости. В основу расчётов положены закономерности движения сферического тела в среде с сопротивлением. Падению мелких зёрен противодействует сила вязкого сопротивления среды, определяемая законом Стокса [6]. Осаждению крупных зёрен препятствует динамическое сопротивление в соответствии с законом Ньютона.

Установившуюся скорость падения зёрен диаметром d определяют по времени t выпадения их в осадок из столба известной высоты H , полагая при этом участок ускоренного движения пренебрежимо малым:

$$v_n(d) = H/t.$$

В момент времени $t=0$ зерно начинает падать с верхнего уровня, ко времени t из взвеси выпадут в осадок все зёрна. Процесс нарастания осадка зависит от гранулометрического состава зерна и описывается следующим выражением:

$$\beta = \int_0^t \beta_r(t) dt = - \int_{r_{\max}}^{r_{\min}} \beta(r) dr, \quad (1)$$

где β – относительное содержание в осадке зёрен определённого радиуса; r – радиус зёрен; r_{\max} , r_{\min} – максимальный и минимальный радиусы зерна; $\beta_r(t)$ – отображение во времени плотности распределения зерна по размерам; $\beta(r)$ – плотность распределения зерна по размерам.

Дифференцируя зависимость (1) по времени, получаем связь между плотностью распределения зерна по размерам и её отображением во времени.

Если характеристика по размерам чувствительнее в области мелких зёрен, то временная характеристика более чётко отражает изменения в распределении крупных зёрен, имеющих большое значение, т. е. набухание увлажнённого зерна приводит к увеличению его первоначального объёма и снижению плотности (набухшее зерно падает медленнее, так как плотность зерна меньше).

Конструкция седиментометрического прибора. В основе ускоренного метода седиментационного анализа лежит измерение электрического сопротивления осадка в сосуде в процессе осаждения. По этому принципу авторами разрабо-

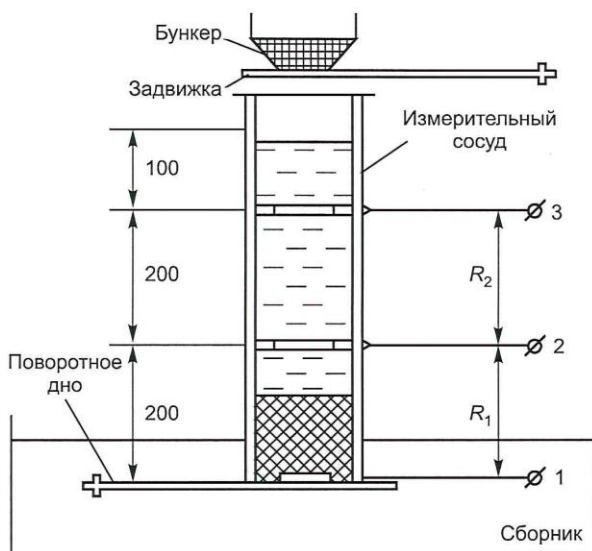


Рис. 1. Схема измерительного сосуда:
1, 2, 3 – электроды; R_1 , R_2 – электрическое сопротивление на участке между электродами

тан лабораторный прибор, предназначенный для автоматического определения гранулометрического состава зерна.

Основной частью прибора является измерительный сосуд, изображенный на рис. 1. Измерительный сосуд выполнен из электроизоляционного материала (стекла) в форме цилиндра с внутренним диаметром 50 мм и высотой 1000 мм. Во внутренней части сосуда размещены металлические кольцевые электроды 1, 2, 3, находящиеся на равном расстоянии (200 мм) друг от друга. В верхней части сосуда расположен бункер с передвижным перекрытием (задвижкой). Нижнее отверстие сосуда перекрывается плоским металлическим электродом, который предназначен для измерения сопротивления осадка с высокой чувствительностью и является одновременно клапаном перекрытия и слива воды. Толщина электрода 1 мм.

Участок измерительного сосуда между электродами подключён к блоку преобразования, соединённому с автоматическим самопишущим прибором.

Действует данный прибор следующим образом: при открытии бункера, расположенного в верхней части сосуда, зёрна падают в заполняющую сосуд вязкую жидкость, разделяются по размерам и осаждаются на дно в соответствии с законом Стокса. По мере увеличения осадка электрическое сопротивление (R_1 , R_2) на участке между электродами изменяется.

Прохождение электрического тока через сосуд обеспечивается электропроводностью заполняющей пространство жидкости (раствора). Электропроводность раствора подчиняется закону Ома и зависит от природы растворителя и растворимых веществ. Под действием электрического тока изменяется диэлектрическая поляризация среды.

Для регистрации процентного содержания зёрен разных размеров разработана электрическая схема (рис. 2) со следующими рабочими номинальными значениями: $U_{II} \approx 44$ В, $U_{III} \approx 12$ В – напряжения вторичных обмоток трансформатора; $R_3=20$ кОм, $R_4=15$ кОм, $R_6=5,6$ кОм, $R_7=5,6$ кОм, $R_8=10$ кОм, $R_9=2,7$ кОм, $R_{10}=5,6$ кОм, $R_{11}=1,3$ кОм – сопротивления нагрузок; $R_5=6,8$ кОм – переменное сопротивление; напряжения на неинвертирующем (прямом) и инвертирующем (инверсном) входе операционного усилителя К140УД1Б составляют соответственно 9 и 10 В; напряжение питания ± 9 В; ёмкость конденсатора 10 Ф.

Измерение сопротивления электролитов всегда производится на переменном токе. Используем здесь мостовой метод. В качестве одного плеча моста R_1 служит нижняя часть сосуда с осадком, а второго R_2 – верхняя часть сосуда с раствором (см. рис. 1). Электрическое сопротивление между крайними электродами по мере выпадения зёрен в осадок увеличивается. Участок между крайними электродами измерительного сосуда представляет последовательное соединение сопротивлений R_1 , R_2 :

$$R_{12} = R_1 + R_2, \quad (2)$$

где R_{12} – сопротивление между электродами измерительного сосуда.

Так как предполагаем сферическую форму зёрен, удельное сопротивление которых намного больше, чем у жидкости, то по закону Максвеллу получим следующие выражения:

$$R_1 = \rho_0 h_{oc} (1 + 0,5 C_{Vm}) / [S_{12} (1 - C_{Vm})], \quad (3)$$

$$R_2 = \rho_0 (1 + 0,5 C_{V2}) (h_{12} - h_{oc}) / [S_{12} (1 - C_{V2})], \quad (4)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление жидкости в сосуде; C_{Vm} – объёмная и молекулярная концентрация зёрен в осадке, т. е. полностью осевших на дне сосуда; h_{oc} – высота осадка; S_{12} – электрическая сила между электродами измерительного сосуда; C_{V2} – объёмная концентрация зёрен на участке между электродами; h_{12} – расстояние между электродами.

Для высоты осадка справедливо следующее выражение:

$$h_{oc} = G_{3,oc} / (\gamma C_{Vm} S_{12}), \quad (5)$$

где $G_{3,oc}$ – масса осевших зёрен; γ – плотность зерна.

Подставив (3)–(5) в (2), установим связь электрического сопротивления с массой осадка:

$$R_{12} = \frac{S_0}{S_{12}} \left[\frac{G_{3,oc}}{\gamma C_{Vm}} \left(\frac{1 + 0,5 C_{Vm}}{1 - C_{Vm}} - \frac{1 + 0,5 C_{V2}}{1 - C_{V2}} \right) + \frac{h_{12} (1 + 0,5 C_{V2})}{1 - C_{V2}} \right] \approx \frac{\gamma \rho_0}{S_{12}} \left(\frac{1,5 G_{3,oc}}{\gamma S_{12} (1 - C_{Vm})} + h_{12} \right). \quad (6)$$

Соотношение (6) выражает линейную зависимость сопротивления от массы осадка. С ростом сопротивления увеличивается и напряжение, снимаемое с электродов. Баланируется мост при первоначальной настройке схемы с

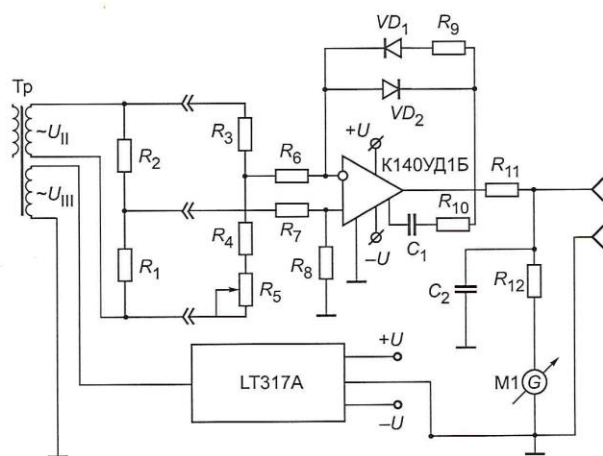


Рис. 2. Электрическая схема:

U_{II} , U_{III} – напряжения вторичных обмоток трансформатора; R_1 , R_2 – электрические сопротивления на участке между электродами; R_3 , R_4 , R_6 , R_7 , R_8 , R_9 , R_{10} , R_{11} – сопротивления нагрузок; R_5 – переменное сопротивление; К140УД1Б – операционный усилитель; $\pm U$ – источники питания; C_1 , C_2 – ёмкости конденсатора; М1 – стрелочный прибор; LT317A – источник стабилизированного напряжения

помощью переменного сопротивления 6,8 кОм. Сигнал разбаланса моста подаётся на выход операционного усилителя.

Стрелочный прибор M_1 (см. рис. 2) необходим для контроля баланса моста с помощью резистора R_6 . Источник стабилизированного напряжения служит для подачи питающих напряжений ± 9 В на операционный усилитель.

Основной проблемой при усилении сигналов постоянно-го тока является стабилизация рабочей точки транзисторов с целью минимизации изменения напряжения небаланса. Качество усилителя тесно связано с минимальным уровнем сигналов, на которые он реагирует. Этот уровень ограничен действующим значением напряжений сигналов, помех, приведённых ко входу устройства. Входной каскад, в свою очередь, оказывает решающее влияние на качество и работоспособность усилителя и должен обеспечивать соответствующее усиление по току, большое входное и малое выходное сопротивление, высокую динамику выходного сигнала, двуполярный сигнал относительно земли и возможность присоединения добавочного каскада усиления мощности.

Таким образом, процесс определения гранулометрического состава зерна с помощью разработанного седиментометрического прибора включает в себя осаждение анализируемых проб зерна, измерение электропроводности осадка с последующим расчётом процентного содержания зёрен различных фракций.

Повышение точности измерений всех показателей гранулометрической характеристики можно достичь при осаждении зерна в растворе соли, плотность которого приближена к плотности зерновки. Для лабораторных испытаний с использованием двухкоординатного регистратора концентрация раствора соли была подобрана таким образом, чтобы скорость осаждения зерна снизилась вдвое. В условиях производства оптимальным может оказаться другой, специально подобранный режим осаждения проб, связанный с системой регулирования. Наибольшее влияние на точность измерения скорости осаждения оказывает невоспроизводимость отбора проб и введения их в водную среду, что иногда приводит к кучному осаждению зерна в

форме связанных зёрен.

Заключение. Разработан лабораторный прибор, работа которого основана на седиментационном методе анализа. Прибор предназначен для автоматического определения гранулометрического состава зерна. Новизна описанного прибора заключается в замене традиционного гравиметрического способа определения высоты осадка на измерение электропроводности зёрен в автоматическом режиме, что позволяет получать непрерывную функцию распределения зёрен по размерам с возможностью варьирования формы выдачи информации о гранулометрическом составе.

Возможности седиментационного анализа позволяют также исследовать определение других параметров (например, таких как влажность, степень набухания, температура и др.) технологических процессов мукомольного, крупяного и комбикормового производств.

Л и т е р а т у р а

1. **Егоров Г. А.** Управление технологическими свойствами зерна. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2000.
2. **Панкратов Г. Н.** Гранулометрический состав продуктов размола // Хлебопродукты. 2015. № 5. С. 46–49.
3. **Панкратов Г. Н.** Анализ закономерности распределения по размерам частиц продуктов размола зерна // Хлебопродукты. 2016. № 9. С. 58–61.
4. **Гринман И. Г., Блях Г. И.** Контроль и регулирование гранулометрического состава продуктов измельчения. Алма-Ата: Наука, 1967.
5. **Taubner H., Roth B., Tippkötter R.** Determination of soil texture: comparison of the sedimentation method and the laser-diffraction analysis // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2009. No. 172. P. 161–171.
6. **Фигуровский Н. А.** Седиментометрический анализ. М.: АН СССР, 1948.

Дата принятия: 17.03.2017.