

УДК 621.319

Д. А. Гринюк, доцент (БГТУ); И. О. Оробей, доцент (БГТУ);
Н. М. Богослав, ассистент (БГТУ)

УСТРОЙСТВО НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЦЕССА СМАЧИВАНИЯ

Статья посвящена вопросам теории капиллярного впитывания, которое широко распространено в природе, технике, сельском хозяйстве, повседневном быту и играет важную роль в протекании многих процессов. Для оптимального управления такими процессами необходимо получение законов, описывающих явление впитывания с учетом воздействия на него окружающей среды. В работе представлено устройство, позволяющее по изменению емкости конденсатора определять время капиллярного впитывания тестовой бумагой. Разработанное авторами устройство может быть использовано для анализа сточных вод при использовании бумаги, параметры которой варьируются в незначительном диапазоне, или для определения характеристик бумаги (например, ее пористости) при известном составе воды.

The article covers the problems of the theory of a capillary soaking, which widely distributed in the nature, technique, agriculture, a daily housekeeping and plays the relevant role in passing of many processes. For optimal control of such processes it is necessary to develop the principles presenting an effect soaking with a glance of influence on it of environment. The device allowing on fluctuation of capacitor capacity to determine a time of capillary soaking by a test paper is introduced in the work. The device developed by authors can be used for wastewater analysis at paper usage which one arguments are varied in an insignificant range, or for definition of characteristics of a paper (for example, its void porosity) at a known structure of water. The job is proved to be actual and can discover operational use both for optimization of purification processes of water treatment, and in contribution links of production of a paper.

Введение. Явление смачивания широко проявляется в технике, сельском хозяйстве, повседневном быту и играет важную роль в протекании природных процессов [1].

Смачивание имеет существенное значение в современных металлургических процессах. В порошковой металлургии широко применяется спекание тонкодисперсных керамических материалов в присутствии жидких металлов. Для спекания необходимо, чтобы жидкие металлы могли проникнуть в тонкие поры, в том числе и непосредственно в места контактов твердых частиц. Поэтому одно из обязательных условий жидкофазного спекания заключается в хорошем смачивании частиц спекаемого материала. Хорошее смачивание необходимо в технологии процессов соединения различных материалов (при пайке, сварке, склеивании). Как правило, смачивание трудно обеспечить без удаления с поверхности твердого металла окисной пленки. Исключением в этом отношении являются системы, в которых возможно проникновение припоя под окисную пленку и дальнейшее распространение под ней (например, при пайке алюминиевых сплавов припоем на основе галлия). Значительную роль играет при пайке и растекание. Обычно большая скорость растекания благоприятствует смачиванию. В связи с этим в качестве одной из технологических характеристик растекаемости припоя используется размер площади, которую может смочить капля данной массы.

Обширный круг практических приложений физико-химических закономерностей смачивания связан с очисткой твердых поверхностей от всевозможных загрязнений, т. е. с мощным действием. Смачивание первоначально гидрофобных поверхностей водными растворами поверхностно-активных веществ представляет первую стадию отмыывания загрязнений. Поэтому мыла наряду с другими свойствами (стабилизацией образующихся при отмыывании суспензий или эмульсий) должны быть и эффективными смачивателями – гидрофилизаторами.

Процесс смачивания определяется гидрофильным (гидрофобным) взаимодействием жидкой и твердой фаз. От эффективности взаимодействия фаз зависит ход протекания многих технологических процессов, в которых твердая фаза имеет высокую концентрацию поверхности в объеме. В частности, значение угла смачивания во многом определяет процессы протекания фильтрации, флотации, коагуляции, нанесения покрытий, пропитки и т. д. Решение задач построения эффективных систем управления такими процессами невозможно без оценки физико-химической характеристики поверхности раздела фаз, а следовательно, без аппаратуры, которая бы позволяла с высокой точностью определять данные параметры. Целью данной статьи является разработка устройства для определения времени капиллярного впитывания и угла смачивания.

Основная часть. В зависимости от числа фаз, участвующих в смачивании, различают два основных случая [2]:

1) смачивание при полном погружении твердого тела в жидкость (иммерсионное смачивание), в котором участвуют только две фазы: жидкость и твердое тело. Иммерсионное смачивание обычно реализуется при смачивании порошков и мелких частиц;

2) контактное смачивание, в котором наряду с жидкостью с твердым телом контактирует третья фаза – газ или другая жидкость. Возможны также случаи, когда в смачивании участвуют четыре различные фазы: твердое тело, газ и две жидкости.

Одним из основных в теории смачивания является понятие краевого угла Θ . Это угол между касательной к поверхности жидкости и смоченной поверхностью твердого тела. Необходимо различать равновесные и неравновесные краевые углы. Равновесный краевой угол Θ_0 зависит только от термодинамических свойств системы и, следовательно, при данных внешних условиях будет иметь одно определенное значение.

Краевые углы, которые измерены при отклонении системы от состояния термодинамического равновесия, называются неравновесными.

Во время контакта фаз, участвующих в смачивании, неравновесные краевые углы могут изменяться. Краевые углы, изменяющиеся в процессе растекания жидкости по поверхности твердого тела, называются динамическими Θ_d . Для динамических краевых углов характерно, что их изменение происходит при перемещении линии (периметра) смачивания. Зависимость динамических краевых углов от времени характеризует скорость растекания жидкости.

Обширная область практических приложений законов смачивания связана с движением жидкости в пористых средах. Сюда входят разнообразные случаи пропитки пористых тел, процессы сушки, фильтрация. При смачивании жидкостью пористого материала, например, бумаги, наблюдается впитывание, скорость которого зависит от следующих характеристик: параметров бумаги (состава, пористости, формы пор, их удельной поверхности и т. д.); состава и свойств воды; внешних факторов.

Таким образом, существует две задачи, которые могут быть решены при анализе данных систем. В первом случае при использовании воды с заранее известным составом и стабилизированными параметрами скорость впитывания будет напрямую зависеть от параметров бумаги, что позволяет анализировать характеристики бумаги на соответствие ГОСТ.

Второй случай связан с использованием стандартизированной бумаги, параметры которой могут варьироваться в незначительном диапазоне. В этом случае основное влияние на скорость впитывания оказывают состав воды и внешние условия. Данные системы могут быть использованы для анализа состава воды.

Таким образом, необходимо наличие устройства, которое позволило бы оценить динамику процесса впитывания, что в свою очередь обеспечивает возможность прямо или косвенно характеризовать ход протекания многих технологических процессов.

Оценку физико-химических параметров можно производить по наблюдению за процессом пропитки фильтровальной бумаги с заранее известными (или неизвестными) свойствами. В силу большого разброса характеристик исследуемых сред актуальной представляется разработка бесконтактного принципа измерения фронта распространения в процессе движения жидкости. Процесс впитывания характеризуется изменением диэлектрической проницаемости конденсатора, в качестве диэлектрика которого используется впитывающая жидкость бумага. Прибор (рис. 1) состоит из трех преобразователей. Каждый из преобразователей представляет собой конденсатор, между обкладками которого помещается бумага. Емкость с исследуемой средой имеет непосредственный контакт с двумя образцами бумаги. Один образец связан с нижней частью пробы, другой – с верхней.

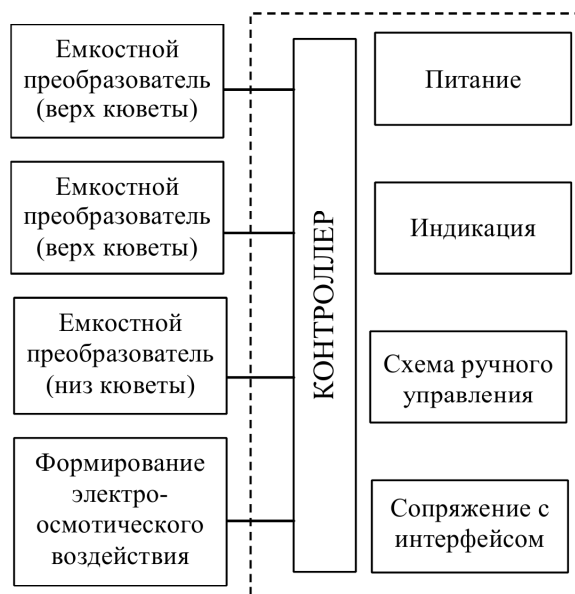


Рис. 1. Функциональные блоки преобразователя

Все конденсаторы располагаются в горизонтальной плоскости и имеют квадратную

форму. Медные металлические поверхности отделены от бумаги тонким слоем пластического диэлектрика для исключения поверхностного течения жидкости под действием статического давления. Из-за особенностей производства бумаги часто наблюдается зависимость ее свойств от направления. Для оценки анизотропии бумаги верхний конденсатор разбит на равные секторы, и процесс измерения движения фронта производится раздельно. Для расширения процесса физико-химического анализа свойств в нижний конденсатор встроена система электродов, позволяющая формировать разнополярные кратковременные импульсы, которые приводят к возникновению электроосмотического течения. При одной полярности происходит ускорение движения фронта жидкости, при другой – замедление. Влияние электроосмотических импульсов оценивают с помощью тех же конденсаторов.

Анализируемая жидкость или влажный осадок помещается в кювету, которая располагается в центре конденсаторных пластин, после чего начинается процесс смачивания (впитывания). По мере распространения фронта смачивания емкости измерительных конденсаторов увеличиваются. Наличие двух конденсаторов позволяет анализировать седиментационные свойства осадков, разделение которых будет происходить непосредственно в процессе измерения.

Сформированный в измерительной схеме преобразователя конденсатор включается в резонансный контур с индуктивной катушкой $L1$. В свою очередь, контур подключается к источнику повторителю на транзисторе $VT1$, который обеспечивает высокое входное и низкое выходное напряжения (рис. 2). Схема представляет собой генератор, состоящий из источника повторителя, дифференциального уси-

лителя, реализованного на биполярных транзисторах $VT2$ и $VT3$, и ключа на транзисторе $VT5$, формирующего цифровой выходной сигнал AF , который подключается непосредственно на дискретный вход контроллера.

Изменение резонансной частоты параллельного колебательного контура, состоящего из катушки $L1$ и исследуемой переменной емкости C_A , параметры которой изменяются по мере смачивания фильтровальной бумаги, помещенной между обкладками конденсатора, приводит к изменению частоты на коллекторе транзистора $VT6$. Конденсатор $C3$, подключенный параллельно к контуру, обеспечивает первоначальную подстройку резонансной частоты.

Определим параметры индуктивной катушки при резонансной частоте 500 кГц и емкости $C_3 = 40$ пФ. Эквивалентная емкость контура составляет:

$$C_p = C_3 + C_A = 100 \text{ пФ.} \quad (1)$$

Резонансная частота параллельного колебательного контура определяется из соотношения

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2)$$

отсюда получаем, что индуктивность катушки составит $L \approx 1$ мГн.

Задаваясь параметрами катушки $d = 1$ см, $l = 3$ см, при диаметре провода, равном 0,015 см, можно определить, что число витков катушки составит $n = 592$.

Резистор $R3$ и емкость $C2$ обеспечивают положительную обратную связь. Схема позволяет генерировать импульсы на частоте параллельного колебательного контура. При изменении параметров исследуемой емкости меняется частота и данное изменение регистрируется на контроллере прямым методом (ведется подсчет числа импульсов за установленное время).

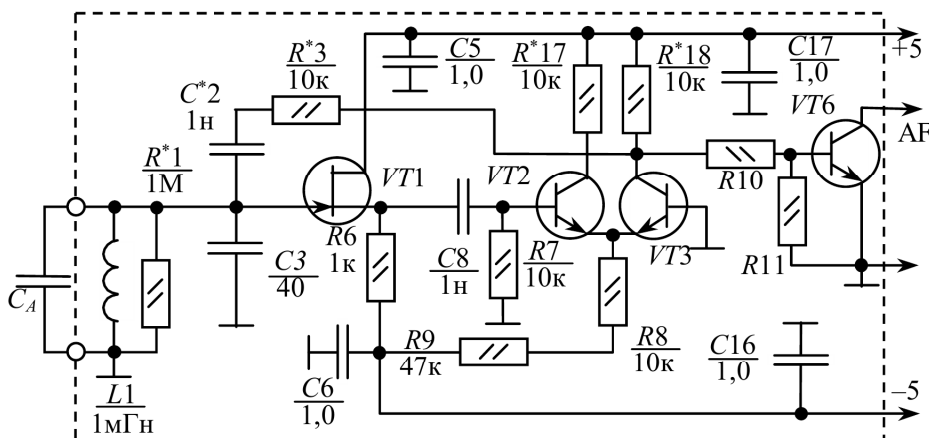


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная емкостного преобразователя:
 C_A – анализируемая емкость; $L1$ – катушка регистрации; $DA1$ – КР538УН3;
 $DA2$ – КР140УД6; $VT1$ – КП303Г; $VT2, VT3, VT6$ – КТ368А

Сигнал от трех одинаковых параллельных измерительных схем поступает на блок цифровой обработки. Он включает однокристалльный микроконтроллер ADUC831 с памятью программ, жидкокристаллический индикатор, приемопередатчик сигналов интерфейса RS-232 и оптоэлектронный переключатель режимов работы. Формы электроосмотических импульсов формируются на программируемых дискретных выходах. Увеличение размаха напряжения осуществляется за счет дополнительной схемы, которая гальванически развязана по отношению к выходам контроллера. Форма сигнала формируется за счет широтно-импульсной модуляции, несущая которой выделяется фильтром низкой частоты перед силовыми транзисторами. Включение сопротивления 100 Ом непосредственно в цепь электродов обеспечивает измерение электроосмотического тока с помощью встроенного в контроллер АЦП.

Использование переменного электроосмоса позволяет добиться лабильности электрического воздействия по отношению к исследуемой среде.

Циклы работы измерительных блоков синхронизирует программный таймер, реализованный на микроконтроллере. Контроллер также управляет работой и считывает данные, поступившие от емкостных преобразователей, обрабатывает результаты, передает информацию в индикатор, сбрасывает сторожевой таймер, активирует переключатель и считывает его состояние, формирует и принимает сигналы по RS-232. Программное обеспечение разработано на языке СИ. Результаты измерений и служебная информация отображаются на индикаторе и передаются по RS-232 по запросу с компьютера. Переключение режимов и просмотр истории проведенных измерений осуществляется с помощью клавиатуры.

Целью измерения емкости является получение зависимости движения фронта смачивания от времени. Существуют некоторые трудности в интерпретации измерений. Структура реальных пористых материалов разнообразна и сложна. Для описания процесса пропитки используют различные модели пористого тела, приближенные к структуре порового пространства реальных объектов. В процессе развития течения жидкости по капиллярам возможны различные ситуации. В наиболее простой модели можно считать, что развитие фронта происходит по экспоненциальной зависимости. Эта модель применима, если не наблюдается изменение параметров краевого угла, не происходит закупоривание капилляров мелкими частицами, которые могут присутствовать в осадке. Отдельным вопросом

является влияние поверхностно-активных веществ в исследуемой среде. В этом случае могут проявляться нелинейные эффекты, обусловленные изменением концентрации растворенных ионов по мере движения жидкости по капиллярам. Например, для капилляров малых диаметров характерен эффект Марангони – Гиббса, который проявляется в виде появления дополнительного течения жидкости за счет градиента концентрации растворенных веществ вдоль оси капилляра.

Течение жидкостей в капиллярах в общем случае подчиняется уравнению Пуазейля:

$$Q = \pi \Delta P r^4 \frac{t}{8\eta L}, \quad (3)$$

где Q – объем, прошедший через капилляр к моменту времени t ; ΔP – перепад давления на концах капилляра; r , L – соответственно радиус и длина капилляра; η – вязкость жидкости.

Для верхнего конденсатора гидростатическое давление незначительно, и движение в основном будет определяться капиллярным давлением. Для нижнего капилляра существенную роль может играть гидростатическое давление. При движении жидкости в сквозных капиллярах под действием капиллярных сил перепад давления определяется разностью капиллярного и гидростатического давления [2]:

$$\Delta P = P_k - \rho g l \sin \alpha, \quad (4)$$

где $P_k = 2 \sigma \cos \theta / r$ – капиллярное давление; σ – поверхностное натяжение; θ – краевой угол смачивания; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; l – высота поднятия жидкости; α – угол наклона капилляра по отношению к горизонтальной плоскости.

По причине влияния давления в устройстве может быть предусмотрено подключение датчика перепада давления в микросхемном исполнении MPXV7002DP фирмы Freescale Semiconductor Inc. MPXV7002DP.

Результаты измерения кинетики пропитки бумаги в процессе каждого измерения подвергаются численной обработке и подгоняются под одну из моделей движения фронта: модель свободного движения жидкости; модель движения с закупоркой капилляров или модель с аномальным движением. После окончания пропитки или снижения скорости распространения фронта намокания до определенного значения на экран выводится номер модели и ее параметры. Предварительные данные процесса можно получить и по запросу. Необходимость электроосмотического воздействия должна быть установлена заранее с помощью клавиатуры.

Заключение. Представленное устройство позволяет по изменению емкости конденсатора определять время капиллярного впитывания тестовой бумагой. Разработанное устройство может быть использовано для анализа сточных вод при использовании бумаги, параметры которой варьируются в незначительном диапазоне, или для определения характеристик бумаги (например, ее пористости) при известном составе воды.

Проведенные эксперименты показали, что по мере распространения фронта смачивания фильтровальной бумаги, помещенной между обкладками конденсатора, емкость преобразователя изменяется в значительном диапазоне (от 60 до 600 пФ). Таким образом, данный ме-

тод может быть использован для разработки прибора, представленного в статье, который в дальнейшем может найти практическое применение как для оптимизации процессов очистки сточных вод, так и в технологических линиях производства бумаги.

Литература

1. Сумм, Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.

2. Аксельруд, Г. А. Введение в капиллярно-химическую технологию / Г. А. Аксельруд, М. А. Альтшулер. – М.: Химия, 1983. – 264 с.

Поступила в редакцию 31.03.2010