

УДК 621.317

М. А. Анкуда, ассистент (БГТУ)

### АДАПТИВНЫЙ МЕТОЧНЫЙ ОДНОКАТУШЕЧНЫЙ ЯМР-РАСХОДОМЕР

В статье рассмотрен способ измерения расхода протонсодержащих жидкостей методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Представлена структурная схема однокатушечного меточного ЯМР-измерителя расхода. Предложен способ построения первичного преобразователя, который позволяет адаптировать систему регистрации под возможные изменения состава вещества либо ее скорости. Рассмотрена система регистрации и обработки данных, которая дает возможность за относительно небольшие промежутки времени обрабатывать полученную информацию и адаптивно подстраиваться под изменения.

In article the way of measurement of the expense a proton of containing liquids by a method of a nuclear magnetic resonance (nuclear magnetic resonance) is considered. The block diagramme of an one-bobbin nuclear magnetic resonance-measuring instrument of the expense is presented. The way of construction of the primary converter which allows to adapt registration system under possible changes of structure of substance or its speed is offered. The system of registration and data processing which gives the chance to process the received information for rather small time intervals is considered and is adaptive to be arranged under changes.

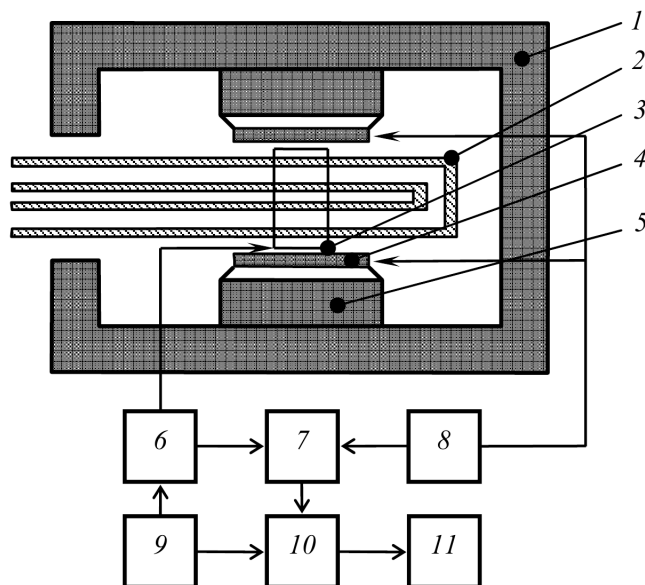
**Введение.** Технологические процессы химической промышленности характеризуются разнообразием информативных параметров. Для эффективного управления процессами необходимо применять устройства, которые позволяют наиболее точно фиксировать технологические параметры с наименьшими затратами. Большое внимание следует уделять точности проводимых измерений.

В состав большинства веществ входят атомы водорода – вещества, дающего сигнал ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Это позволяет использовать метод ЯМР для получения информации о некоторых технологических параметрах, таких как расход, влажность, концентрация. Эффект ЯМР наблюдается на образцах, содержащих достаточное количество ядер с большими значениями магнитных моментов [1]. Использование ЯМР в движущихся средах для технологических процессов ограничивается жидкостями или сжатыми газами, содержащими водород, фтор, литий, хлор и фосфор. Несмотря на определенные ограничения по составу измеряемой среды, такого типа расходомеры можно широко использовать для измерения малых расходов протонсодержащих жидкостей, что весьма актуально для многих отраслей народного хозяйства. Относительная простота изготовления подобного прибора, основанного на эффекте создания меток ЯМР, отсутствие механических включений в тракт течения жидкости, высокая точность дают ему преимущества перед другими расходомерами.

**Основная часть.** ЯМР-расходомер для промышленного использования должен обеспечить измерение расхода жидкостей в течение 0,5–3,0 с, иметь малое гидравлическое сопротив-

ление, высокое быстродействие (3–5 с), широкий диапазон измеряемых расходов (10–7000 л/ч), обладать помехоустойчивостью к электромагнитным и механическим воздействиям, исключать оседание магнитных частиц из жидкости в гидравлическом тракте. Необходимым условием является высокая точность (до 1%). В данной работе рассматривается меточный однокатушечный ЯМР-расходомер с временным разделением процессов отметки и регистрации, который позволяет повысить точность измерений и расширить диапазон измеряемых расходов за счет изменения расстояния от неподвижной катушки анализатора до петли трубопровода. Структурная схема подобного расходомера приведена на рисунке.

Расходомер содержит магнитную систему 5 поляризатора и анализатора, катушки модуляции 4, которые соединены с генератором модуляции 8. Трубопровод 2 выполнен в виде петли, обе ветви которой размещены внутри неподвижной относительно магнитной системы катушки анализатора 3 и обеспечивают перемещение жидкости в каждой из них в противоположных направлениях. Далее в системе регистрации имеется спиновый детектор 6, соединенный с катушкой анализатора 3, генератор импульсов 9, выходы которого подключены ко входам спинового детектора 6 и блока измерения интервалов времени 10, а также синхронный детектор 7 и устройство индикации 11. При этом вход устройства индикации 11 присоединен к выходу блока измерения интервалов времени 10. Входы синхронного детектора 7 подсоединены к генератору модуляции 8 и спиновому детектору 6, а его выход подключен ко второму входу блока измерения интервалов времени 10.



Структурная схема расходомера:

1 – корпус; 2 – трубопровод; 3 – катушка анализатора; 4 – катушка модуляции;  
5 – магнитная система; 6 – спиновый детектор; 7 – синхронный детектор; 8 – генератор модуляции;  
9 – генератор импульсов; 10 – блок измерения интервалов времени; 11 – устройство индикации

Принцип действия данного расходомера заключается в следующем.

Измеряемая жидкость пропускается по трубопроводу 2. В постоянном магнитном поле, которое образуется под действием магнитной системы поляризатора и анализатора, жидкость приобретает определенную ядерную намагниченность и поступает затем в катушку анализатора 3. Сигнал ЯМР наблюдается периодически, для чего используется модулирующее синусоидальное поле звуковой частоты, создаваемое катушками модуляции 4, от генератора модуляции 8. Анализ вектора намагниченности движущейся жидкости производится при помощи катушки анализатора 3, соединенной со спиновым детектором 6 [2]. Таким образом, в объеме катушки анализатора 3 осуществляется и процесс постановки метки и анализ ядерной намагниченности с помощью спинового детектора 6, управляемого генератором импульсов 9. Это дает возможность создать измеритель с временным разделением процессов отметки и регистрации, в котором анализатор периодически выполняет функцию отметчика, спиновый детектор – нутатора, а расход определяется по смене отмеченной жидкости неотмеченной, измерительным участком служит катушка регистрации. Отметка жидкости в потоке производится инверсией вектора ядерной намагниченности радиочастотным полем катушки анализатора 3 амплитудой импульса генерации спинового детектора 6, вырабатываемого генератором импульсов 9.

В меточных ЯМР-расходомерах требуется устройство, которое периодически изменяет намагниченность жидкости со скоростью, значительно большей скорости течения, и создает в потоке метки ЯМР. Расход определяется по времени прохождения меткой измерительного участка от отметчика до анализатора. В таких расходомерах отметка производится с постоянной частотой, а измеряют интервал времени от отметки до достижения интенсивностью сигнала порогового значения.

Для управления вектором намагниченности можно использовать динамический поворот – нутацию [3], т. е. поворот намагниченности под действием резонансного поля при помещении вещества в постоянное магнитное поле. Угол поворота вектора намагниченности (угол нутации):

$$\theta = \gamma B_1 \Delta t, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – время действия осциллирующего поля на элемент жидкости, определяемое скоростью ее движения и длиной поля нутации.

Подбирая амплитуду поля, скорость жидкости и длину источника, можно обеспечить поворот до  $360^\circ$ , что используется в ЯМР-расходомерии. Недостатком использования нутации является зависимость  $\theta$  от скорости, что усложняет его стабилизацию в широком диапазоне расходов. Поэтому применяется поворот намагниченности при быстром прохождении через резонанс [3]. Если в момент резонанса скорость изменения индукции  $dB / dt$  удовлетворяет условию

$$\frac{dB}{dt} < \gamma B_1^2, \quad (2)$$

или

$$\frac{\gamma B_1^2}{dB/dt} > 3, \quad (3)$$

то осуществляется инверсия ядерной намагниченности (2) для образца, движущегося в поле с продольным градиентом  $\text{grad}_{\text{пр}}B$ :

$$\frac{\gamma B_1^2}{W \text{grad}_{\text{пр}}B} > 3. \quad (4)$$

Выполнение (4) и стабильность инверсии соблюдаются при значительных изменениях расхода. В момент отметки намагниченность находящейся в катушке жидкости меняет знак на протяжении некоторого небольшого промежутка времени. Под действием течения жидкости отмеченный участок выносится потоком из катушки. При этом намагниченность изменяется и после полного выхода метки принимает прежнее значение, равное намагниченности неотмеченной жидкости.

ЯМР в движущихся образцах имеет особенности, связанные с нестационарным взаимодействием полей с ядрами, на которых основаны технические применения ЯМР, в том числе измерение расхода. Особенностью ЯМР в движущихся образцах является зависимость интенсивности сигнала от скорости. В неподвижном образце скорость изменения намагниченности определяется противоположным влиянием намагничивания ядер в постоянном поле  $B_0$  и размагничивания радиочастотным полем  $B_1$  [4]:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\chi_0 B_0 - M}{T_1 - \gamma^2 B_1^2 T_2 M}, \quad (5)$$

где  $M$  – намагниченность в направлении  $B_0$ ;  $\chi_0$  – ядерная магнитная восприимчивость (для связи  $M = B\chi_0$  величина  $\chi_0$ , Ам/(В · с));  $B_1$  – амплитуда резонансного вращающегося поля.

Для создания  $B_1$  используют линейно поляризованное поле катушки, которое можно разложить на два вращающихся в противоположных направлениях поля. Поле, вращающееся в направлении вращения вектора намагниченности, обуславливает резонансные эффекты. Для установившегося процесса ( $dM/dt = 0$ ) стационарная намагниченность пропорциональна интенсивности сигнала [5]:

$$M_s = \frac{\chi_0 B_0}{1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2} = \chi_0 B_0 Z, \quad (6)$$

где

$$Z = (1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2)^{-1}.$$

Для движущейся жидкости намагниченность зависит от намагниченности  $M_{\text{вх}}$  на входе в катушку регистрации и сменяемости в катушке регистрации:

$$M(x) = (M_{\text{вх}} - \chi_0 B_0 Z) \exp\left(-\frac{x}{WTZ}\right) + \chi_0 B_0 Z, \quad (7)$$

где  $x$  – линейная координата по оси катушки регистрации, м;  $W$  – скорость жидкости, м/с.

Амплитуда сигнала ЯМР определяется средней по длине катушки регистрации намагниченностью. Приращение интенсивности сигнала:

$$\frac{A - A_0}{A_0} = \frac{WT_1(M_{\text{вх}} - \chi_0 B_0 Z)}{(\chi_0 B_0 I)(1 - \exp(-l/WT_1 Z))}, \quad (8)$$

где  $A$  – амплитуда сигнала ЯМР движущейся жидкости, В;  $A_0$  – амплитуда сигнала ЯМР от неподвижной жидкости, В.

С увеличением скорости интенсивность сигнала растет, пока вся насыщенная жидкость в объеме регистрации не будет сменяться ненасыщенной за время между двумя актами резонанса, что описывают введением эффективного времени:

$$T_{1\text{э}}^{-1} = T_1^{-1} + T_{1\text{с}}^{-1}, \quad (9)$$

где  $T_{1\text{с}}$  – время, за которое  $1/e$  часть неполяризованных ядер в катушке регистрации сменяется поляризованными из-за течения жидкости.

Далее метка перемещается со скоростью течения жидкости вдоль замкнутого участка трубопровода 2 в виде петли и опять попадает в катушку анализатора 3, что приведет к изменению общей намагниченности в объеме этой катушки. В момент прохождения метки через катушку анализатора 3 знак средней намагниченности в объеме катушки не меняется, так как одновременно через катушку проходят ветви трубопровода 2, одна из которых, направленная в сторону от петли к анализатору, заполнена отмеченной жидкостью, а вторая ветвь, направленная в противоположную сторону, – неотмеченной жидкостью.

Таким образом, дойдя до анализатора, метка формирует сигнал на выходе спинового детектора 6, который будет пропорционален намагниченности в общем объеме катушки. Полученный сигнал будет содержать информацию о времени выхода метки из катушки и о времени перемещения метки по петле трубопровода 2 от момента ее постановки до

момента ее регистрации. Блок измерения интервалов времени  $10$  осуществляет определение нахождения метки в анализаторе, а также время прохождения меткой петли трубопровода  $2$ . О величине расхода можно судить по интервалу времени между моментами формирования метки в жидкости и моментом снятия сигнала ядерной намагниченности, который будет обратно пропорционален величине расхода. После определения интервала времени на устройство индикации  $11$  выводится информация о расходе измеряемой жидкости либо передается на последующие вычислительные устройства.

Ввиду того, что эффект ЯМР наблюдается на образцах, содержащих ядра с большими магнитными моментами, интенсивность сигнала будет зависеть от концентрации ядер в образце. Использование ЯМР в движущихся средах ограничивается жидкостями или сжатыми газами, содержащими водород, фтор, литий, хлор и фосфор. Измерение твердых и сыпучих сред затруднено из-за малых значений времен релаксации. Поскольку любое протонсодержащее вещество способно к релаксации, то эффект размагничивания может происходить быстрее, чем время, которое метка затрачивает на перемещение по петле трубопровода от момента формирования до момента регистрации сигнала намагниченности. Это может быть весьма актуальной проблемой для быстро релаксирующих жидкостей.

С целью адаптации системы первичного преобразователя было предложено при изменении величины расхода либо при изменении релаксирующих свойств вещества перемещать петлю трубопровода относительно катушки анализатора, что приведет к увеличению либо к уменьшению пути жидкости от момента становления метки и до момента ее регистрации. Перемещение петли можно реализовать либо вручную, либо используя систему электромеханического привода, действие которого будет осуществляться до тех пор, пока время на прохождение петлевого участка трубопровода не станет меньше времени релаксации определенного объема протонсодержащей жидкости. При использовании такого метода не требуется вмешательство в структуру системы регистрации, а подстройку первичного преобразователя можно производить независимо от остальной схемы регистрации расходомера. Критерием для реализации подобной схемы подстройки будет служить отсутствие сигнала в катушке регистрации после постановки метки. Для нормальной настройки первичного преобразователя необходимо

продолжать процесс постановки меток в движущейся жидкости с определенной периодичностью и одновременно перемещать петлю трубопровода относительно неподвижной катушки анализатора.

Снижение случайных погрешностей измерения расхода, обусловленных шумами в тракте регистрации, для меточных ЯМР-расходомеров временного типа достигается применением адаптивной частоты отметки и полосы пропускания канала регистрации к скорости жидкости. Погрешность определения информативного параметра связана с напряжением шумов в тракте регистрации:

$$\delta t_{\text{неп}} = \frac{A_{\text{ш}}}{dA/dt}, \quad (10)$$

где  $A_{\text{ш}}$  – амплитуда шумовых флуктуаций сигнала, В;  $dA/dt$  – скорость изменения интенсивности в момент регистрации отметки.

Скорость изменения интенсивности сигнала ЯМР зависит от длины катушки регистрации и функции распределения частиц по скоростям. Для идеального случая постоянной по сечению трубопровода скорости имеем

$$\frac{dA}{dt} = \frac{A_a W}{l} = \frac{A_{\text{ш}} C W}{l}, \quad (11)$$

где  $A_a$  – амплитуда сигнала метки, В;  $C = A_a/A_{\text{ш}}$  – отношение сигнала к шуму.

Идея адаптивной системы регистрации расходомера состоит в повышении частоты отметки пропорционально расходу и в соответствующем изменении полосы пропускания канала регистрации при соблюдении условия однозначности, а также повышает точность измерений [6]. Сигнал каждого одиночного акта измерения может быть использован для оптимальной настройки системы регистрации при следующих. Такой учет предыстории в реальных системах возможен в связи с ограниченной скоростью изменения расхода.

**Заключение.** Предложенный однокатушечный меточный ЯМР-расходомер с временным разделением процессов отметки и регистрации за счет возможности сокращения участка трубопровода позволяет подстраивать устройство таким образом, чтобы размагничивание метки не происходило быстрее, чем время, которое необходимо для прохождения тракта до анализатора. Тем самым обеспечивает повышение точности измерения малых расходов быстро релаксирующих жидкостей, не создавая больших гидравлических сопротивлений. Одновременно с этим параметры системы регистрации улучшены вве-

дением адаптивной отметки и полосы пропускания канала регистрации.

#### Литература

1. Леше, А. Ядерная индукция / А. Леше; пер. с нем. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 684 с.

2. Оробей, И. О. Первичный преобразователь импульсного ЯМР-спектрометра для систем управления / И. О. Оробей, В. В. Сарока // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. – 2002. – Вып. X. – С. 136–138.

3. Абрагам, А. Ядерный магнетизм / А. Абрагам; пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 536 с.

4. Анкуда, М. А. Анализ работы меточного однокатушечного ЯМР-измерителя расхода жидкостей / М. А. Анкуда // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. – 2008. – Вып. XVI. – С. 99–102.

5. Жерновой, А. И. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости / А. И. Жерновой, Г. Д. Латышев. – М.: Атомиздат, 1964. – 384 с.

6. Применение адаптивного ЯМР-расходомера для процессов приготовления реагентов на флотацию / В. В. Сарока [и др.] // Известия ТулГУ. Сер. техн. наук. – 2009. – Вып. 4. – Ч. 1. – С. 135–140.

*Поступила 26.02.2011*