

В. В. Сарока, ассистент; О. И. Оробей, учащийся; Д. А. Гринюк, доцент;
М. А. Анкуда, ассистент; И. О. Оробей, доцент

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА МЕТОЧНОГО ЯМР-РАСХОДОМЕРА ПО СПЕКТРАЛЬНОМУ РАЗЛОЖЕНИЮ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ МЕТКИ ПО ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ УЧАСТКУ

In article are touched questions, connected with actual methods of the analysis of the information parameter marks flowmeter. The Executed studies have allowed to work out the practical recommendations for making the methods of the determination worker parameter marks NMR flowmeter on spectral decomposition magnet when moving the mark on measuring area. The Designed way enables to realize the determination an worker parameter with minimization of inaccuracy, which can contribute such factors as change the mode of the current of the flow, the temperature measured to liquids, as well as time to relaxations. Use the brought methods can be of interest when making marks flowmeter of the different types: heat, electromagnetic, inductions and others.

Введение. Меточный ЯМР-расходомер временного типа (рис. 1) работает следующим образом. Измеряемая жидкость поляризуется в кюветах 2 полями магнитов 1, после чего по транспортному участку поступает в катушку отметки 4, расположенную в поле магнитов 3. Отметка инверсией осуществляется импульсами радиочастотного поля. Регистрация намагниченности с целью определения времени распространения метки ЯМР по измерительному участку производится модуляционным методом в катушке 6, расположенной в поле магнитов анализатора 5. Поле модуляции создают катушки 7 [1]. При разработке меточных ЯМР-расходомеров существует проблема оценки информативного параметра.

Основная часть. Поскольку интенсивность сигнала в катушке регистрации без учета насыщения в первом приближении пропорциональна намагниченности жидкости, то следует получить

выражение для намагниченности в анализаторе. Примем, что индукции B_{n1} , B_{n2} , B_a направлены по оси Oz (рис. 1), а жидкость движется по оси Ox . Процесс намагничивания описывается уравнениями Блоха, в которых можно пренебречь действием радиочастотных полей с равновесным значением намагниченности, зависящим от x , так как $B_0 = B(x)$ (рис. 1), т. е. $M_0 = \chi_0 B_0 = \chi_0 B(x)$. При отметке инверсией намагниченности в разных сечениях гидравлического тракта имеют вид

$$M_{A-A} = \chi_0 B_{n1} \left[1 - e^{-V_{n1}(\rho T_1)^{-1}} \right], \quad (1)$$

$$M_{B-B} = \chi_0 B_{n1} \left[1 - e^{-V_{n1}(\rho T_1)^{-1}} \right] e^{-V_3(\rho T_1)^{-1}}, \quad (2)$$

$$M_{C-C} = (\chi_0 B_2 - M_{B-B}) \left[1 - e^{-V_{n2}(\rho T_1)^{-1}} \right] + M_{B-B}, \quad (3)$$

$$M_{D-D}^{\pm} = \pm M_{C-C} e^{-V_4(\rho T_1)^{-1}}, \quad (4)$$

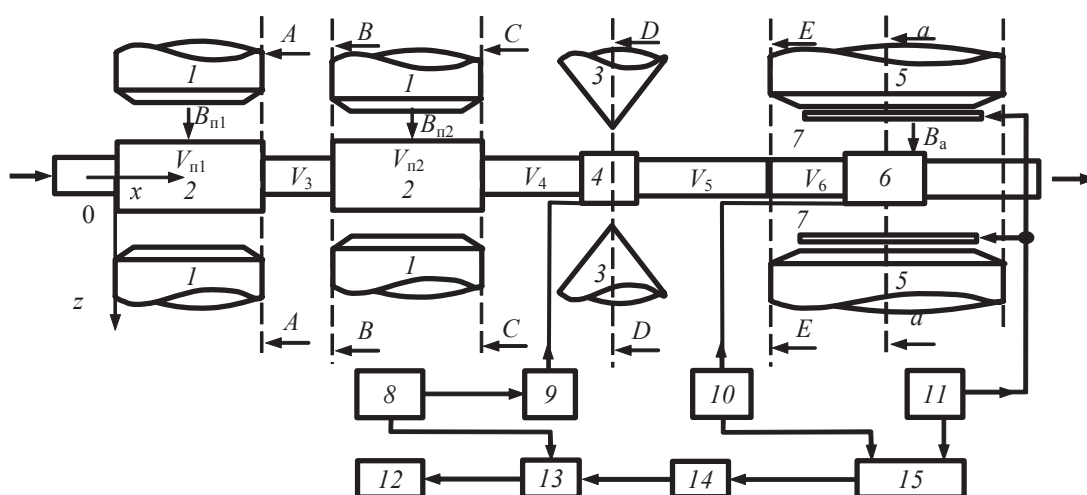


Рис. 1. Структурная схема ЯМР-расходомера временного типа:

- 1, 2 – магниты и кюветы поляризаторов соответственно; 3 – магниты отметки;
4 – катушка отметки; 5 – магниты анализатора; 6 – катушка регистрации;
7 – катушки модуляции; 8 – генератор синхронизации; 9 – генератор нутации;
10 – спиновый детектор; 11 – генератор модуляции; 12 – устройство преобразования и индикации;
13 – фазовый детектор; 14 – блок фильтрации импульсов отметки; 15 – синхронный детектор

$$M_{E-E}^{\pm} = M_{D-D}^{\pm} e^{-V_5(QT_1)^{-1}}, \quad (5)$$

$$M_{a-a}^{\pm} = (\chi_0 B_a - M_{E-E}^{\pm}) \left[1 - e^{-V_6(QT_1)^{-1}} \right] + M_{E-E}^{\pm}, \quad (6)$$

$$M_{\Pi} = M_{a-a}^{+} - M_{a-a}^{-}, \quad (7)$$

где $B_{\Pi 1}, B_{\Pi 2}, B_a$ – индукции полей поляризаторов и анализатора соответственно; V_3, V_4 – объемы транспортных участков; V_5, V_6 – объемы измерительного участка вне и в поле анализатора соответственно; $V_{\Pi 1}, V_{\Pi 2}$ – объемы поляризаторов; M_{Π} – амплитуда метки. Верхние знаки в (4)–(7) соответствуют объемам с инвертированной намагниченностью, нижние – с инвертированной. Единицы измерения используемых в расчетах величин: объемы – см³; расход – л/ч; индукции полей – Гс; время релаксации – с; намагниченность – Гс. Расчет намагниченностей в характерных точках гидравлического тракта первичного преобразователя позволяет получить диапазон измеряемых расходов, но не дает величины погрешностей.

Оценку погрешностей можно проводить по информативному параметру, которым в меточных расходомерах является время перемещения метки по измерительному участку. Одним из возможных методов определения этого времени следует считать спектральный анализ движения метки [2]. Рассмотрим методику на примере расходомера, представленного на рис. 1. Пусть отметка производится инверсией намагниченности импульсами радиочастотного поля катушки нутации со скважностью 2. Используя разложение в ряд Фурье, с учетом (1)–(4) получаем намагниченность в сечении отметки:

$$M_{D-D} = \frac{4}{\pi} M_{C-C} \exp\left(-\frac{V_4}{QT_1}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\omega_{\Pi} t}{n}\right), \quad (8)$$

где n – номер гармоники в разложении импульсов намагниченности в ряд Фурье; ω_{Π} – частота импульсов отметки; t – интервал времени от момента отметки.

С учетом распределения скоростей и домагничивания на измерительном участке зависимость от времени намагниченности в объеме регистрации имеет вид

$$M_{\kappa}(t) = \frac{2\pi V_{\kappa, \text{п}}}{S_{\Pi}} \chi_0 B_a \int_0^R \left(1 - e^{-\frac{V_6}{S_{\Pi} W(r) T_1}} \right) r dr + \frac{16M_{C-C}}{\omega_{\Pi}} e^{-\frac{V_4}{QT_1}} \int_0^R e^{-\frac{V_5+V_6}{S_{\Pi} W(r) T_1}} W(r) \times \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\omega_{\Pi} V_{\kappa, \text{п}}}{2S_{\Pi} W(r)}\right) \times$$

$$\times \sin\left(n\omega_{\Pi} \left(t - \frac{V_5 + V_6}{S_{\Pi} W(r)}\right)\right) r dr, \quad (9)$$

где $V_{\kappa, \text{п}}$ – объем катушки регистрации; S_{Π} – площадь поперечного сечения трубопровода на измерительном участке; $W(r)$ – распределение скоростей.

Первое слагаемое в (9) дает постоянную составляющую намагниченности в объеме катушки регистрации из-за домагничивания в анализаторе, второе – переменную, характеризующую движение метки:

$$u(t) = K_{\Pi} 16M_{C-C} \exp\left(\frac{-V_4}{QT_1}\right) \omega_{\Pi}^{-1} \times \times \int_0^R \exp\left(\frac{-(V_5 + V_6)}{S_{\Pi} W(r) T_1}\right) W(r) \times \times \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\omega_{\Pi} V_{\kappa, \text{п}}}{2S_{\Pi} W(r)}\right) \times \times \sin\left(n\omega_{\Pi} \left(t - \frac{V_5 + V_6}{S_{\Pi} W(r)}\right)\right) r dr, \quad (10)$$

где K_{Π} – коэффициент пропорциональности.

Поле анализатора не влияет на переменную часть намагниченности и (10), т. е. домагничивание на измерительном участке не оказывает воздействия на информативный параметр. Подставляя в (10) распределения скоростей для разных режимов течения, получаем выражения для метки при ламинарном и турбулентном потоках. Время перемещения метки по измерительному участку определяется из уравнения

$$u(t) = A_{\text{г}}, \quad (11)$$

где $A_{\text{г}}$ – уровень срабатывания.

В ЯМР-расходомерах критерием прихода фронта метки в катушку регистрации является $u(t) = 0$. Приравнявая к нулю (10), получаем уравнения для расчета информативного параметра.

Расчет временных диаграмм метки ЯМР для разных расходов проведен в пакете Matlab. На рис. 2 приведены рассчитанные временные диаграммы метки для разных расходов при ламинарном и турбулентном потоках для расходомеров с гидравлическим трактом в виде цилиндрического прямого трубопровода.

Метки ЯМР ставятся в нулевой момент времени. Момент пересечения фронта метки с осью времени является информативным параметром. Расположения фронтов меток при ламинарном и турбулентном режимах не совпадают. На малых расходах присутствует набег фаз – фаза предыдущего импульса фиксируется

после установки последующей метки. Это явление указывает на сложность измерения малых диапазонов расходов методом ЯМР, что критично при конструировании расходомеров малых расходов [3].

Численное решение уравнений для определения времени перемещения метки ЯМР осуществлялось методом дихотомии. Погрешность вычисленного значения информативного параметра до 0,2% обеспечивалась при 500 шагах разбиения радиуса трубопровода с учетом гармонических составляющих метки с частотой, в 600 раз большей частоты отметки.

Значительные несовпадения информативных параметров при ламинарном и турбулентном потоках приводят к большим погрешностям при смене режима течения. Относительные погрешности при смене режима течения достигают 30%. Большая часть расходов приходится на участок с турбулентным режимом течения. Несовпадение времени перемещения метки наблюдается и с изменением времени релаксации жидкости, что вызывает появление релаксационных погрешностей ЯМР-расходомеров. На погрешности для турбулентного режима изменения T_1 особого влияния не оказывают (до 3% при минимальных расходе и T_1), релаксационные погрешности имеют максимум при малых скоростях. Изменения T_1 оказывают влияние для ламинарного режима (до 12% при минимальных расходе и T_1), погрешности имеют максимум при малых скоростях. Исходя из этого появляется необходимость компенсации релаксационных погрешностей для малых расходов.

При построении систем управления особую роль играет информация о динамических

характеристиках измерительных преобразователей. Информативным параметром, по которому определяется расход жидкости, является время перемещения метки ЯМР по измерительному участку расходомера от момента постановки метки до момента регистрации. В идеальном случае (отсутствие искажений формы метки, связанных с режимом течения и T_1 среды):

$$Q = (V_5 + V_6)t_n^{-1}. \quad (12)$$

На t_n оказывают влияние многие факторы. При определении статических характеристик необходимо учитывать и компенсировать влияние тех факторов, которые вносят наибольший вклад в погрешность измерения информативного параметра. Статическая характеристика как функция расхода от $(t_n)^{-1}$ получена методом наименьших квадратов (МНК) для различных степеней аппроксимирующего многочлена по расчетным данным. Для определения необходимой степени аппроксимирующего многочлена применяются аппроксимирующие многочлены до десятой степени. По квадратичной погрешности оценивалась ошибка аппроксимации:

$$\Delta = \sqrt{\sum_n (Q_n - Q_{\text{апп}n})^2 n^{-1}}, \quad (13)$$

где $Q_{\text{апп}}$ – расход по аппроксимирующему полиному; n – количество точек измерения.

Результатом оценки является вывод о достаточности использования полиномов четвертого порядка для описания процесса:

$$Q = a_0 + a_1 t_n^{-1} + a_2 t_n^{-2} + a_3 t_n^{-3} + a_4 t_n^{-4}, \quad (14)$$

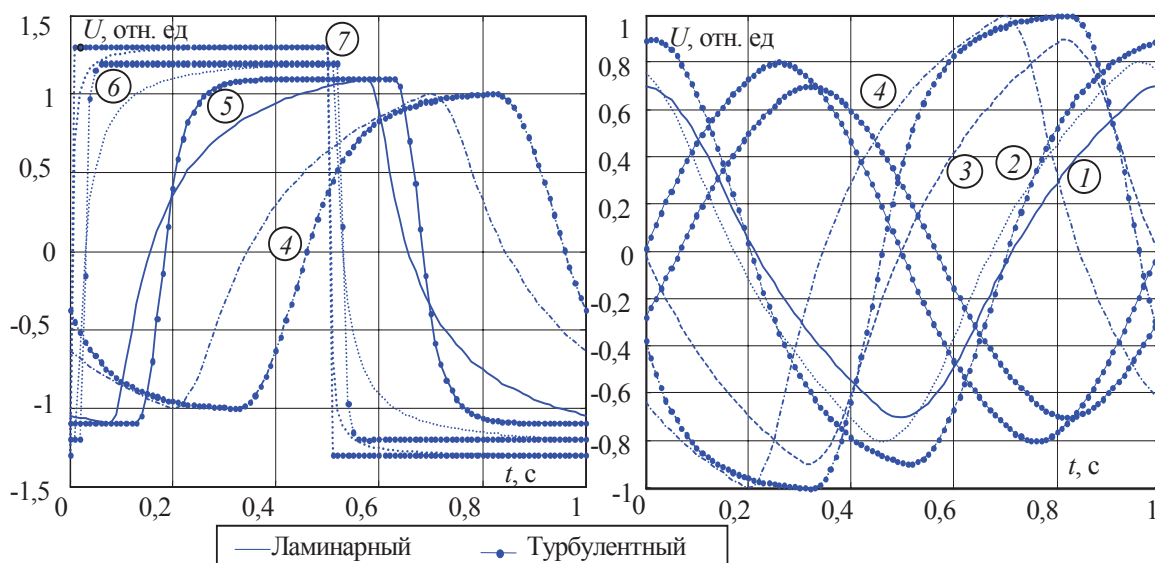


Рис. 2. Метки ЯМР при ламинарном и турбулентном режимах ($V_{n1} = 50 \text{ см}^3$; $V_3 = V_5 = 0$; $V_{n2} = 40 \text{ см}^3$; $V_4 = 3,14 \text{ см}^3$; $V_6 = 9,4 \text{ см}^3$; $B_a = 2800 \text{ Гс}$; $\omega_n = 2\pi \text{ рад/с}$; $V_{кр} = 3,14 \text{ см}^3$; $D = 20 \text{ мм}$; $T_1 = 3,5 \text{ с}$; рад/с):
1–7 отвечают расходам 0,0085; 0,0091; 0,013; 0,02; 0,05; 0,30; 1,94 л/с соответственно

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты аппроксимирующего полинома.

Статическая характеристика носит нелинейный характер даже при неизменном режиме течения. При выводе передаточной функции необходимо учитывать работу в диапазоне расходов, охватывающем разные режимы, для которых характерно существенное изменение коэффициентов аппроксимирующего полинома, что вносит дополнительный вклад в нелинейность передаточной функции. Для статической линеаризации получим

$$\frac{dQ}{dt_n^{-1}} = a_1 + 2a_2 t_n^{-1} + 3a_3 t_n^{-2} + 4a_4 t_n^{-3} \quad (15)$$

и учтем, что измеряемый диапазон состоит из двух участков с ламинарным и турбулентным течением, которые имеют свои коэффициенты полинома

$$\frac{dQ}{dt_n^{-1}} = \begin{cases} a_{1л} + 2a_{2л} t_n^{-1} + \dots + 4a_{4л} t_n^{-3}, & t_n > t_{п.кр} \\ a_{1т} + 2a_{2т} t_n^{-1} + \dots + 4a_{4т} t_n^{-3}, & t_n < t_{п.кр} \end{cases} \quad (16)$$

где $a_{хл}, a_{хт}$ – коэффициенты аппроксимирующих полиномов в (14) для ламинарного и турбулентного режимов течения, выбираемые для соответствующих T_1 ; $t_{п.кр}$ – время перемещения метки, соответствующее критическому расходу и определяемое по (14) и известному критическому расходу.

Измерение расхода связано с временем распространения метки. Информация о расходе поступает с запаздыванием на измерительном участке, которое обусловлено расходом. Это запаздывание лежит в диапазоне от миллисекунд до секунды, т. е. в передаточную функцию преобразователя расхода входит звено с переменным запаздыванием. На время запаздывания влияют свойства жидкости и режимы течения. Используя аппроксимацию зависимости времени перемещения метки от расхода по МНК, определяем коэффициенты полинома, описывающего запаздывание. Оценка ошибки обосновывает использование для аппроксимации запаздывания полиномов четвертого порядка:

$$\tau_n = (b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2 + \dots + b_4 Q^4)^{-1}, \quad (17)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты аппроксимирующих полиномов для ламинарного и турбулентного режимов течения, выбираемые для соответствующих T_1 .

Передаточная функция по каналу время перемещения метки – расход представляется в виде

$$W_a(p) = \frac{dQ}{dt_n^{-1}} e^{-\tau_n p}. \quad (18)$$

Из амплитудофазочастотных характеристик (АФЧХ), построенных по (18) для ламинарного

и турбулентного режимов течения, видно, что одним и тем же частотам соответствует разный сдвиг фаз метки ЯМР, поэтому малоинерционные системы с меточными преобразователями могут быть неустойчивыми.

Описание процессов, влияющих на скорость перемещения метки ЯМР, с помощью спектрального анализа функции намагниченности отдельных элементов жидкости с последующим синтезом интегральной намагниченности позволяет провести расчет информативного параметра, но занимает много времени для вычисления.

Интерес представляет интегральная оценка информативного параметра и сравнение полученных на ее основе результатов со значениями, вытекающими из (8)–(11). Введем величину нормированной относительно максимально возможной в потоке намагниченности, информирующей о метке ЯМР:

$$M_{\text{норм}}(r, dr) = \frac{M_n(r)S(r, dr)}{M_{\text{max}}}, \quad (19)$$

где $M_n(r)$ – амплитуда метки для слоя на расстоянии r от центра трубопровода; $S(r, dr)$ – площадь кольца толщиной dr на расстоянии r ; M_{max} – максимальная амплитуда метки.

С учетом (1)–(7) определим скорость метки ЯМР, принимая во внимание весовой вклад в результирующую метку нормированной переменной намагниченности слоя жидкости, представленной в (19):

$$W_{\text{ЯМР}} = \int_0^R \frac{M_{\text{норм}}(r, dr)W(r)}{\pi R^2}. \quad (20)$$

Из (20) следует равенство средней скорости потока и скорости метки ЯМР при большом T_1 или постоянстве скорости среды по сечению. Полное перемешивание жидкости на транспортном участке, обеспечивающее равномерную по сечению намагниченность на входе в катушку отметки, можно учесть условием $V_4 = 0$. Время прохождения меткой ЯМР измерительного участка:

$$t_n = (V_5 + V_6)(\pi R^2 W_{\text{ЯМР}})^{-1}. \quad (21)$$

Заключение. Релаксационные погрешности исследовались на воде и водных растворах медного купороса, моделирующих T_1 . Погрешности смены режима течения оценивались сравнением зависимостей информативного параметра от расхода при разных температурах. Подбор вязкости изменением температуры обеспечивает перемещение переходного режима от 20 до 7000 л/ч. Релаксационными погрешностями, связанными с зависимостью T_1 от температуры, можно пренебречь из-за незначи-

тельности по сравнению с погрешностями смены режима течения.

Экспериментальные значения оказались ниже расчетных в 2–5 раз, что объясняется малой длиной транспортного и измерительного участков по сравнению с длиной начального участка, на котором происходит развитие ламинарного или турбулентного течения. Совпадение с экспериментом получено при суммарной длине транспортного и измерительного участков, в 2–5 раз превышающей внутренний диаметр.

Процессы, протекающие в меточном ЯМР-расходомере, аналогичны процессам для всех типов расходомеров, измеряющих в качестве информативного параметра время распространения метки (радиационные, ионизационные, тепловые и т. д.), поэтому методику расчета информативного параметра и передаточной функции можно распространить на все меточные расходомеры с затухающей меткой.

Литература

1. Сарока, В. В. ЯМР-измеритель расхода / В. В. Сарока, И. О. Оробей, А. Л. Пархимович // Компьютеризация в химической и смежных отраслях промышленности: материалы Международ. науч.-техн. семинара, Новополоцк, 15 дек. 2005 г. / ПГУ. – Новополоцк, 2006. – С. 68–71.

2. Сарока, В. В. Метод исследования массопереноса жидких сред на эффекте ЯМР / В. В. Сарока, И. О. Оробей, А. Е. Пряхин // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы Международ. науч.-техн. конф., Минск, 22–24 окт. 2003 г. / БГТУ. – Минск, 2003. – С. 35.

3. Методика расчета релаксационных погрешностей меточных ядерно-магнитных расходомеров нутационно-фазового типа при ламинарном течении / А. Е. Пряхин [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 1986. – Т. 51, № 6. – С. 1011–1015.