

**МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МАССОПЕРЕНОСА
ЖИДКИХ СРЕД НА ЯМР**

Одним из способов измерения малых расходов нефтепродуктов является метод, основанный на явлении ядерного магнитного резонанса ЯМР.

Использование расходомеров ЯМР для исследования массопереноса жидких сред часто ограничивается низкой точностью измерения малых расходов, что обусловлено наличием ряда эффектов (затухание метки ЯМР на измерительном участке, паразитное подмагничивание жидкости в анализаторе и т.д.). Для измерения малых расходов жидкостей можно использовать эффект Джекобсона – Вангснесса. Суть этого эффекта заключается в следующем. При регистрации спектра ЯМР в изменяющемся со временем магнитном поле скорость изменения расстройки частоты прецессии ядер образца от резонансной отлична от нуля, что приводит к сдвигу резонансной частоты, называемому сдвигом Джекобсона – Вангснесса. При этом возникают также искажения форм кривых поглощения и дисперсии.

При движении жидкости со скоростью W в поле с продольным градиентом (градиентом по направлению течения жидкости) $grad B$ поле, воздействующее на элемент объема жидкости, изменяется по закону:

$$dB/dt = W \cdot grad B, \quad (1)$$

Это эквивалентно условиям, необходимым для существования сдвига Джекобсона – Вангснесса [3]. При постоянном продольном градиенте сдвиг частоты и искажения форм спектра ЯМР для каждого типа жидкостей однозначно связаны со скоростью движения жидкости. Для измерения расхода целесообразно использовать искажения форм спектра ЯМР, т.к. эти искажения проявляются сильнее, чем сдвиг частоты.

Для измерения расхода с использованием эффекта Джекобсона – Вангснесса трубопровод с жидкостью помещается в магнитное поле с продольным градиентом, после чего производится запись спектра ЯМР от движущейся жидкости модуляционным методом с последующим синхронным детектированием (рисунок 1).

Выбором частоты и амплитуды модуляции, а также условий записи спектра (скорости развертки поля при прохождении линии ЯМР магнитным полем или скорости изменения частоты резонансного поля) можно добиться того, чтобы для каждого выделенного объема жидкости скорость изменения расстройки частоты прецессии ядерных

моментов от частоты резонансного электромагнитного поля определялась формулой (1), т.е. скоростью жидкости и продольным градиентом магнитного поля.

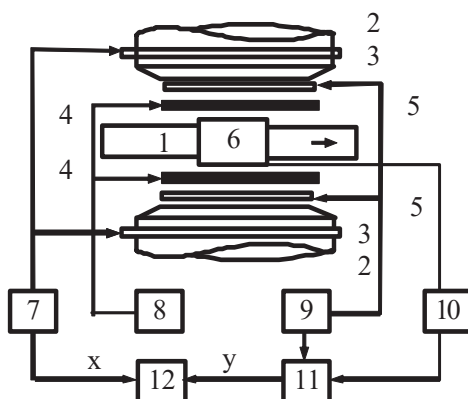


Рисунок 1 – Схема установки для исследования массопереноса жидких сред на эффекте Джекобсона – Вангснесса:

1 – трубопровод; 2 – магниты; 3 – катушки развертки; 4 – катушки продольного градиента магнитного поля; 5 – катушки модуляции; 6 – катушка регистрации; 7 – блок развертки; 8 – блок задания градиента; 9 – генератор модуляции; 10 – спиновый детектор; 11 – синхронный детектор; 12 – регистратор.

Для оптимизации параметров расходомера, работающего по описанному принципу, производилось исследование зависимости формы спектра ЯМР от скорости течения жидкости для двух типов жидкостей – водопроводной воды, имеющей времена релаксации $T \approx 2$ с, и децимолярного раствора $NiSO_4$ в воде ($T < 0,01$ с). Тракт движения жидкости представлял собой стеклянную трубку с внутренним диаметром 6 мм, на которую намотана катушка регистрации; при этом для децимолярного раствора $NiSO_4$ в воде поляризация резонирующих ядер осуществляется в части трубки, непосредственно прилегающей к катушке регистрации и в самой катушке регистрации. Для водопроводной воды применялась предварительная поляризация резонирующих ядер. Запись спектров сигнала ЯМР производилась при следующих условиях:

- частота модуляции – 250 Гц;
- амплитуда модуляции – 5×10^{-6} Тл;
- скорость развертки магнитного поля – $2,5 \times 10^{-6}$ Тл/с;
- градиент магнитного поля в направлении движения жидкости – $2,5 \times 10^{-3}$ Тл/м;
- индукция поляризующего поля и поля анализатора – 0,3 Тл;
- постоянная времени синхронного детектора – 0,3 с;
- длина катушки регистрации – 10 мм.

Амплитуда высокочастотного поля выбиралась уменьшением радиочастотной мощности до тех пор, пока форма сигнала останется неизменной, а величина сигнала изменяется пропорционально амплитуде высокочастотного поля, при этом эффектами насыщения можно пренебречь. Асимметрия формы первой производной линии поглощения для каждого типа жидкостей однозначно связана с величиной скорости жидкости и взаимной ориентацией векторов скорости и продольного градиента магнитного поля (рисунок 2, рисунок 3), что дает возможность измерять малые скорости (расходы) жидкости (рисунок 4).

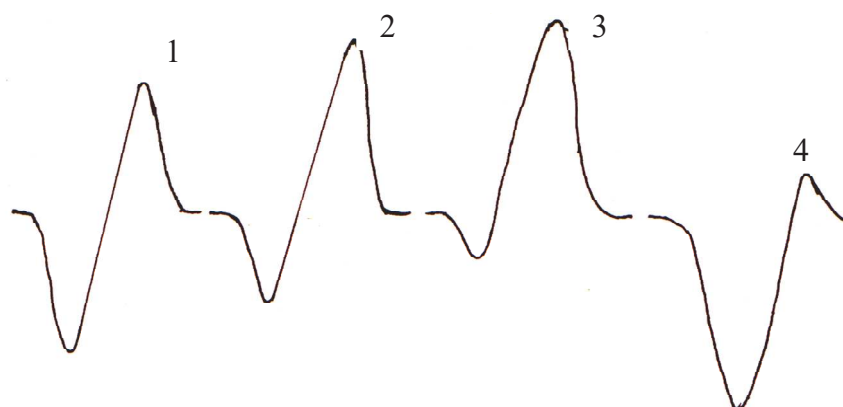


Рисунок 2 – Первые производные линии поглощения для децимолярного раствора $NiSO_4$ в воде:

1 – жидкость неподвижна; 2 – скорость жидкости $1,2 \times 10^{-2}$ м/с;
3 – скорость жидкости 5×10^{-2} м/с; 4 – скорость жидкости 5×10^{-2} м/с
(направление движения жидкости изменено на противоположное).

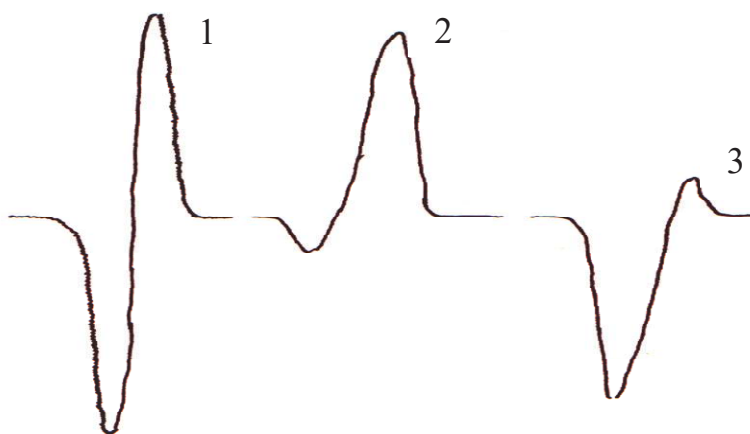


Рисунок 3 – Первые производные линии поглощения для водопроводной воды:

1 – жидкость неподвижна; 2 – скорость жидкости 3×10^{-2} м/с;
3 – скорость жидкости 3×10^{-2} м/с
(направление движения жидкости изменено на противоположное).

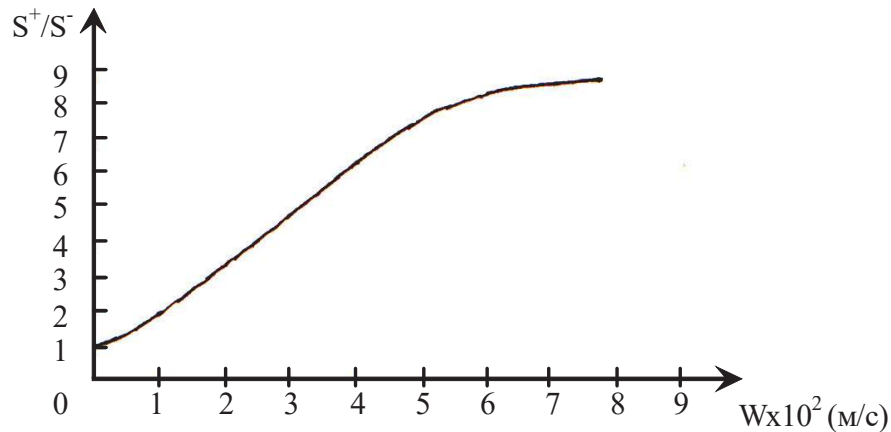


Рисунок 4 – Зависимость отношения площадей положительной и отрицательной частей первой производной линии поглощения от расхода (скорости) жидкости для децимолярного раствора $NiSO_4$ в воде.

Полученные результаты показывают перспективность предложенного метода для исследования массопереноса жидких сред; и по ряду показателей, таких как точность измерения малых скоростей (расходов), обеспечение измерения реверсивных потоков и простота реализации, превосходит известные методы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. –Л.: Машиностроение, 1975, 776 с.
2. Жерновой А.И. Латышев Г.Д. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. – М.: Атомиздат, 1964, 252 с.
3. Jacobsohn A., Wangness R. Shapes of nuclear induction signals. – Phys. Rev., 1948, v.73, p.942–946.

УДК 539.14.43

**Анкуда М.А., Оробей И.О.,
Сарока В.В., Олиферович Н.М.**

(Белорусский государственный технологический университет)

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕТОЧНЫХ ЯМР-РАСХОДОМЕРОВ

Повышение точности измерения расходомеров на эффекте ядерного магнитного резонанса (ЯМР) требует анализа процессов, протекающих в первичном преобразователе, математическое описание