

УДК 539.143.43

РЕЛАКСОМЕТР ЯМР В ЗЕМНОМ ПОЛЕ

© П.М.Бородин, Н.М.Вечерухин

Научно-исследовательский институт физики
Санкт-Петербургского государственного университета

Поступила в редакцию 15 мая 1997г.

В настоящей работе дано описание аппаратуры, обеспечивающей наблюдение сигнала ЯМР в земном поле. Рассматривается ЯМР метод, в котором информация о макроскопическом движении жидкости получается за счет взаимодействия магнитных моментов ядер движущейся жидкости с внешним магнитным полем. Принцип действия устройства по определению скорости течения исследуемой жидкости основан на регистрации изменений фазы сигнала ЯМР - сигнала свободной ядерной индукции в магнитном поле Земли. Проведена экспериментальная проверка теоретических предпосылок, подтверждающая возможность измерения скорости течения жидкости посредством контроля фазы сигнала ЯМР в однородном магнитном поле.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с актуальностью задачи бесконтактного дистанционного измерения различных гидродинамических параметров жидкости наряду с другими физическими методами с 1960г. начали применяться методы, основанные на ядерном магнитном резонансе. Информация о макроскопическом движении жидкости в ЯМР-методах получается за счет взаимодействия магнитных моментов ядер движущейся жидкости с внешним магнитным полем [1,2]. Особый интерес представляет использование геомагнитного поля для наблюдения ЯМР, поскольку в этом случае значительно упрощается аппаратура (не требуется магнита или другого источника сильного магнитного поля). Однако при наблюдении сигнала в слабом поле $B_0 = 50 \text{ мкТл}$ требуется предварительная поляризация ядер исследуемого образца, чтобы повысить интенсивность сигнала ЯМР. Обычно это делается при помощи поляризующего поля $B_p = 5 \text{ мТл}$, прикладываемого к исследуемому объекту перед наблюдением сигнала.

СИГНАЛ СВОБОДНОЙ ИНДУКЦИИ ЯДЕР

Каждый образец можно охарактеризовать вектором макроскопической ядерной намагниченности M , которая определяется количеством ядер в единице объема, обладающих магнитными моментами. Значение M связано с величиной магнитного поля B , в котором он находится, следующим соотношением $M = \chi B$ (χ — магнитная восприимчивость). Кроме того, в присутствии однородного магнитного поля B_0 вектор прецессирует вокруг направления B_0 с частотой $\omega_0 = \gamma B_0$, где γ — гиромагнитное отношение ядра. Процессы установления равновесных значений продольной и поперечной (относительно вектора B_0) компонент ядерной намагниченности характеризуется временами соответственно продольной и поперечной релаксации [3].

Процесс формирования сигнала ЯМР в земном поле происходит в соответствии с рис.1. Датчик ЯМР, представляющий собой катушку индуктивности L плоской или цилиндрической формы, при помощи переключателя катушка L присоединяется к источнику тока поляризации, что приводит к созданию в исследуемой области образца магнитного поля поляризации B_p . По окончании процесса поляризации (3–6 сек) в момент времени t_0 катушка L переключается и оказывается включенной в параллельный колебательный контур LC , настроенный на частоту ЯМР ω_0 .

Если ось катушки L ориентирована перпендикулярно направлению магнитного поля Земли B_0 , то после переключения с момента времени t_0 в ней будет индуцироваться сигнал свободной индукции (СИ) ядер в земном поле (выключение B_p для этого должно быть неадиабатически быстрым [3]). Амплитуда этого сигнала будет убывать со

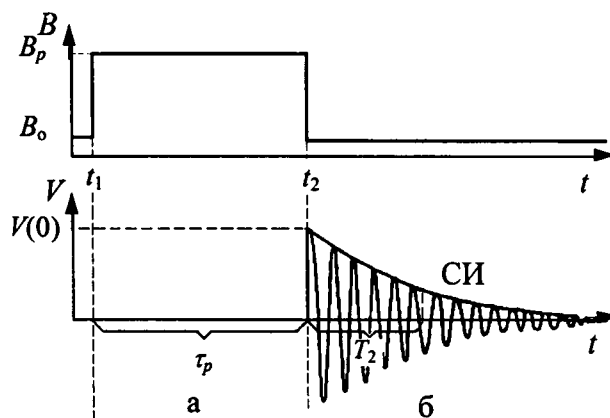


Рис. 1. Получение сигнала свободной индукции ядер: а — процесс поляризации ядер продолжительностью τ_p магнитным полем B_p ; б — наблюдение сигнала СИ в магнитном поле Земли B_0 .

временем по экспоненциальному закону:

$$V(t) = V(0)\exp(-t/T_2)\sin \omega_0 t,$$

где $V(0)$ — начальная амплитуда сигнала СИ, T_2 — время спин-спиновой или поперечной релаксации ядер, t — текущее время. Время T_2 может быть определено по наблюдаемому сигналу СИ как время, за которое амплитуда $V(t)$ изменяется в "е" раз.

По сигналу СИ можно установить и время спин-решеточной или продольной релаксации T_1 , связанное с временем воздействия τ_p поля поляризации на образец согласно формуле

$$V(\tau_p) = V_0(1 - \exp(-\tau_p/T_1)),$$

где V_0 — максимальная амплитуда сигнала СИ для данного B_p , получаемая при $\tau_p \rightarrow \infty$.

В соответствии с выше приведенным принципом получения сигнала СИ в земном поле на современной элементной базе был создан ЯМР-релаксометр. В качестве исследуемых ядер были выбраны протоны, что позволило регистрировать

сигнал СИ в магнитном поле Земли на частоте $\nu_0 = \omega_0 / 2\pi \approx 2\text{кГц}$.

АППАРАТУРА

Релаксометр ЯМР в земном поле может функционировать в двух режимах: одноканальном (амплитудном) — для наблюдения сигналов свободной индукции, двухканальном (фазометрическом) — для регистрации изменения фазы сигнала СИ. Макет прибора включает в себя следующие узлы: систему управления, блок формирования сигнала, датчик, приемный тракт, регистрирующее устройство. В одноканальном режиме релаксометр действует согласно блок-схеме, представленной на рис.2а.

В состав системы управления входят программируемый контроллер "Электроника — МС 2702" и интерфейс связи. Контроллер программным путем формирует последовательность и длительности импульсов управления, осуществляет синхронизацию работы всей установки, организует накопление и первичную обработку экспериментальных данных. При необходимости возможно установление связи контроллера по последовательному порту с персональным компьютером. Интерфейс связи обеспечивает полную гальваническую развязку (на базе микросхемы К293ЛП1) контроллера с блоком формирования сигнала.

Поскольку используемые датчики ЯМР имеют достаточно большую индуктивность (100мГн), то для получения сигнала СИ в земном поле целесообразно применять адиабатическое (медленное) выключение поляризирующего поля с последующим воздействием 90-радиочастотным импульсом [3].

Блок формирования сигнала производит коммутацию постоянного тока поляризации в датчике и создание радиочастотных импульсов. В соответствии с управляющим импульсом происходит медленное выключение постоянного тока по заданному закону, организованное на основе транзистора КТ827А. Эта схема позволяет коммутировать ток в катушках датчика ЯМР (в высокодобротной индуктивной нагрузке, $Q \approx 50$) до 15А. Остаточный ток оконечного каскада равен 1мкВ, что вызывает появление в пределах исследуемого образца дополнительного магнитного поля, величина которого составляет сотую долю процента значения поля Земли (при необходимости возможно устранение остаточного тока [4]).

Радиочастотный импульс формируется методом ударного возбуждения контура. При воздействии короткого импульса тока на приемный параллельный колебательный контур в нем возникают свободные колебания с частотой ω_0 . Затем с помощью оптопары АОУ 103В (светодиод-фототиристор), включенной параллельно контуру, согласно управляющему импульсу происходит гашение свободных колебаний. Далее, варьируя длительностью импульса тока и выбирая

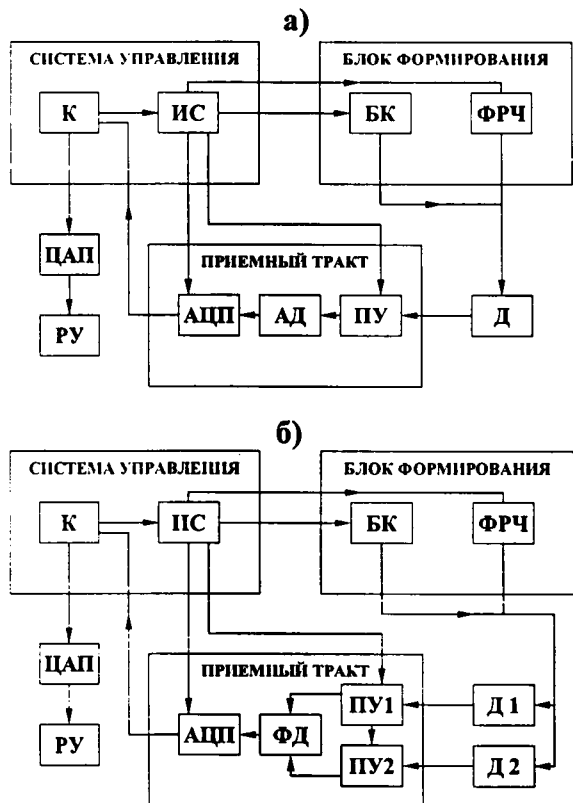


Рис. 2. Блок-схема релаксометра ЯМР в земном поле в режимах функционирования: а) — одноканальном; б) — двухканальном. К — контроллер; ИС — интерфейс связи; БК — блок коммутации; ФРЧ — формирователь радиочастотных импульсов; Д, Д1, Д2 — датчики ЯМР; ПУ, ПУ1, ПУ2 — предусилители; АД — амплитудный детектор; ФД — фазовый детектор; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; РУ — регистрирующее устройство.

желаемую задержку процесса шунтирования, формируется радиочастотный импульс с заданными амплитудой и длительностью.

В состав приемного тракта входят предусилитель, амплитудный детектор, аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Параметры усилителя: $R_{вх} > 300$ кОм, $U_{вх} = (10-100)$ мкВ, полоса пропускания (1,6-2,6) кГц, коэффициент усиления $K_U = 50000$, напряжение шумов, приведенное ко входу, составляет 1 мкВ. Процесс стробирования усилителя происходит по команде с контроллера.

Через порт ввода-вывода контроллера и цифро-аналоговый преобразователь сигнал СИ поступает на регистрирующее устройство, в качестве которого использовались осциллограф и самопишущий потенциометр ПДП4-002. Временной масштаб осциллограмм устанавливался программным путем.

Фазометрический режим работы релаксометра происходит в соответствии с блок-схемой, изображенной на рис.2б. В отличие от одноканального режима здесь блок формирования сигнала обеспечивает получение сигналов СИ одновременно с двух разных датчиков. Затем сигналы поступают на фазовый детектор, фиксирующий на выходе импульс, длительность которого τ пропорциональна разности фаз регистрируемых сигналов. Далее этот импульс через линейный преобразователь $\tau \rightarrow U$ (время-напряжение) достигает АЦП.

Для фазового детектирования в качестве опорного сигнала можно использовать синусоидальный сигнал от генератора, однако в этом случае необходимы синхронизация начальных фаз сигналов и непрерывный контроль индукции магнитного поля Земли. Одновременное же формирование обоих сигналов ЯМР обеспечивает не только такую синхронизацию благодаря созданию радиочастотных импульсов методом ударного возбуждения, но и компенсацию вариаций геомагнитного поля. Кроме того, существует дополнительное требование к датчикам: различие индуктивностей и добротностей не более 10%.

Связь между датчиком ЯМР и релаксометром осуществляется коаксиальным кабелем, длина которого может достигать 50 м.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пример использования в экспериментах обоих режимов релаксометра осуществлен при исследовании сигналов ЯМР от линейно расположенных рамочных катушек (плоский датчик), вдоль которых протекает протонсодержащая жидкость (в данном случае — дистиллированная вода).

Обычно сигнал ЯМР в земном поле наблюдается при помощи тех же катушек, которые используются для создания поляризуемого поля B_p . Геометрия рамочных катушек и их соответствующая пространственная ориентация позволяют в пределах исследуемого образца пренебречь зависимо-

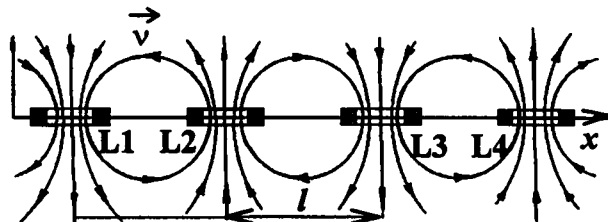


Рис. 3. Портрет силовых линий поляризуемого поля B_p (вид сверху): L1, L2, L3, L4 — катушки датчика ЯМР; v — скорость течения жидкости; l — расстояние между центрами катушек

стью поля B_p от координаты z , кроме того, для компенсации внешней помехи они включены встречно по магнитному потоку. На рис.3 изображен портрет силовых линий поляризуемого магнитного поля B_p в плоскости XY, ортогональной направлению поля Земли B_0 (для наглядности взят 4-х катушечный вариант датчика). Скорость ламинарного потока жидкости v , направленная по оси OX, варьировалась от 10 см/сек до 1 м/сек.

В экспериментах использован двухкатушечный вариант плоского датчика с расстоянием между центрами катушек $l = 14$ см. Он помещался в водонепроницаемый корпус из оргстекла обтекаемой формы. Для получения опорного сигнала ЯМР был взят цилиндрический датчик с внутренним образцом.

Поскольку $B_p \gg B_0$, то вектор ядерной намагниченности определяется соотношением $M = \chi B_p$. Здесь вектор намагниченности ядер одновременно с прецессией в однородном магнитном поле B_0 с частотой ω_0 участвует также в движении, связанном непосредственно с перемещением жидкости в магнитном поле B_p . Такое поведение вектора M с учетом релаксационных процессов описывается модифицированным уравнением Блоха для движущейся жидкости [5,6]:

$$\frac{\partial}{\partial t} M = \gamma [M, B_0] - M/T - (v, \nabla) M,$$

где T — время спин-спиновой или спин-решеточной релаксации ядер, v — скорость потока жидкости, ∇ — оператор Гамильтона. Кроме того, в соответствии с [6] это движение вектора ядерной намагниченности индуцирует в приемном контуре э.д.с.:

$$E(t) = E_0(t) \exp(-t/T_2) \sin[\omega_0 t + \alpha(t)],$$

где $E_0(t)$ — амплитуда сигнала СИ, определяемая геометрией и величиной поля B_p и учитывающая движение образца, $\alpha(t)$ — фаза сигнала, также зависящая от движения жидкости.

Согласно методике эксперимента требовалось регистрировать изменения огибающей $A(t) = E_0(t) \exp(-t/T_2)$ и фазы $\alpha(t)$ сигнала СИ при наличии и движении жидкости вдоль одной и двух

сторон плоского датчика. Такие зависимости должны наблюдаться для различных значений скорости течения жидкости.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Картина поведения амплитуды сигнала с учетом релаксационных процессов при двухстороннем обтекании рамочных катушек жидкостью (рис. 4а) была известна и ранее, причем зависимость положения максимума t_c сигнала КСЭ (ки-

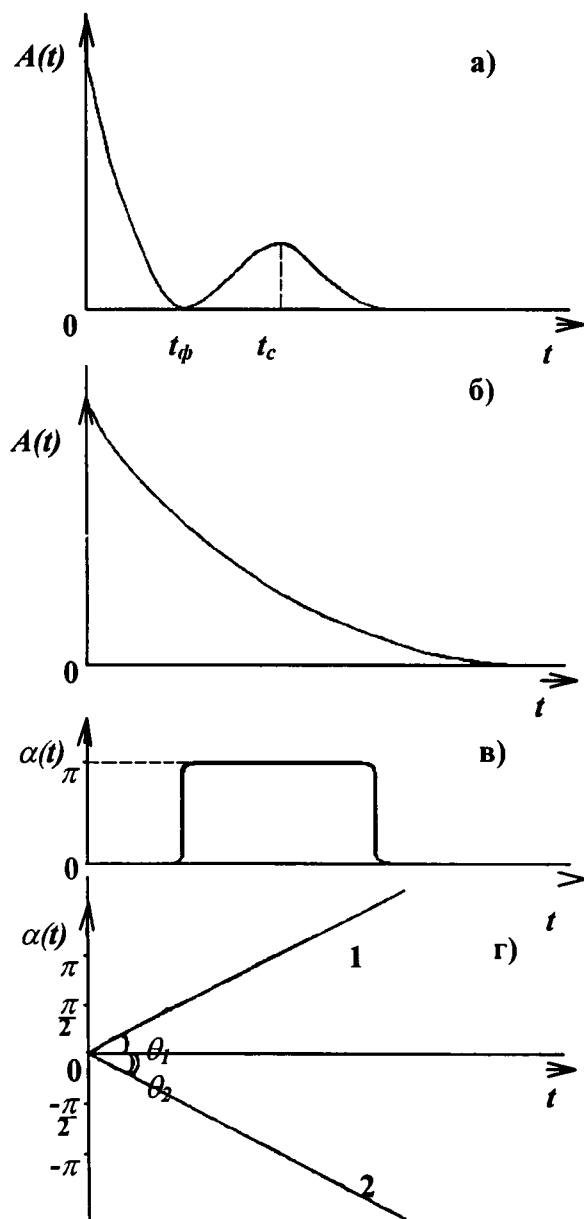


Рис. 4. Поведение огибающей $A(t)$ и фазы $\alpha(t)$ сигналов СИ при движении исследуемой жидкости с постоянной скоростью вдоль катушек плоского датчика:

- {а, в} с двух сторон
- {б, г (кривая 1)} с одной стороны
- {г (кривая 2)} с другой стороны

нематического спинового эха) от скорости потока жидкости выражается соотношением $t_c = l/v$ [7]. С первого взгляда можно было бы ожидать, что при наличии и движении жидкости вдоль одной стороны плоского датчика характер огибающей сигнала должен оставаться таким же как и при обтекании с двух сторон (практически произошло только уменьшение в 2 раза коэффициента заполнения образца), однако эксперимент показал качественно другую кривую (рис. 4б). Объяснить этот факт можно, проанализировав изменения фазы соответствующих сигналов.

Изменения фазы сигналов ЯМР (рис. 4г) для вариантов наличия и перемещения жидкости раздельно вдоль каждой из сторон плоского датчика, как и предполагалось теоретически [6], имеют линейный характер, причем углы наклонов прямых $\theta_1 = \theta_2$. Кроме того, в работе [6] утверждается, что смещение частоты сигнала ЯМР (здесь $\text{tg} \theta_1$) в этом случае составляет величину $\omega_v = \pi v/l$. Это соотношение с точностью до 5% отражает экспериментальную зависимость сдвига частоты сигнала в однородном магнитном поле от скорости потока жидкости, обтекающей плоский датчик только с одной стороны (с другой стороны жидкость отсутствует). Также отметим, что инверсия направления скорости течения жидкости приводит к смещению частоты сигнала ЯМР в противоположную сторону, т.е. по знаку изменения фазы сигнала можно судить о направлении движения жидкости.

Поскольку в проводимых экспериментах $\omega_v \ll \omega_0$, то движение жидкости только вдоль одной стороны датчика не приводит к изменению амплитуды, т.е. сигнал СИ сохраняет естественную форму огибающей, определяемую временем ядерной релаксации T_2 (рис. 4б). А особенности поведения амплитуды и фазы сигнала ЯМР при двухстороннем обтекании катушек (сигнал КСЭ и резкий скачок фазы на π — рис. 4а и рис. 4в) обусловлены суперпозицией двух сигналов, наблюдаемых при движении жидкости соответственно вдоль одной и другой сторон датчика. Момент времени t_ϕ , в который происходит этот скачок фазы, связан со скоростью течения жидкости соотношением $T_\phi = t_c/2 = l/2v$.

Таким образом, независимо, с одной или двух сторон плоского датчика движется жидкость, по изменению фазы сигнала СИ ядер можно определять величину скорости течения этой жидкости. Только при одностороннем обтекании датчика регистрируется непосредственно изменение фазы сигнала СИ, которое прямо пропорционально скорости течения жидкости [8], а при двухстороннем — промежуток времени наблюдения сигнала СИ, который определяет момент скачкообразного изменения фазы этого сигнала на π и имеющий обратно пропорциональную зависимость от величины скорости.

Диапазон измерения скорости потока жидкости

будет определяться не только техническими возможностями приемного тракта релаксометра, но и степенью возмущенности этого потока, поскольку турбулентное течение вызывает сокращение длительности сигнала СИ [9]. Оптимально исследовать жидкости, позволяющие получить амплитуду входного сигнала ЯМР не менее 30 мкВ и имеющие время релаксации протонов $T_2 \geq 1/2v$. В качестве преимущества этого способа измерения скорости отметим возможность работоспособности датчика даже при его обрастании илом и другими образованиями. К недостаткам отнесем необходимость расположения датчиков ЯМР в однородном магнитном поле. Расчеты показали, что наличие неоднородности геомагнитного поля (модуля полного вектора) порядка 8 нТл/м приводит к 10% погрешности измерения скорости потока жидкости.

Следует отметить, что возможности релаксометра ЯМР в земном поле не ограничиваются созданием устройства фазометрического контроля скорости потока жидкости. Не менее значимым является реальная перспектива его применения для бесконтактной нетравмирующей медицинской диагностики [10]. В качестве образцов для таких исследований были взяты плевральные жидкости трех консистенций. При заболеваниях экссудативным плевритом в плевральной полости скапливается жидкость, которая может быть: прозрачной ($T_1 = T_2 = 1000 \pm 30$ мсек), кровянистой ($T_1 = T_2 = 900 \pm 30$ мсек) и гнойной ($T_1 = 220 \pm 10$ мсек, $T_2 = 200 \pm 10$ мсек). Колебания температуры образцов от 10°C до 38°C показали, что при нагреве плевральных жидкостей свыше 27°C времена релаксации T_1 и T_2 меняются в пределах 10%. Здесь значения времен спин-спиновой и спин-решеточной релаксации приведены для температуры 36°C. Рабочий объем исследуемых образцов составлял 100 см³.

Минимальное значение времени ядерной релаксации, которое можно наблюдать с помощью данного релаксометра ЯМР в земном поле, оцени-

вается в пределах 50 мсек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье дано описание устройства, обеспечивающего наблюдение сигнала свободной индукции ядер в земном поле — релаксометра ЯМР. Приведены примеры исследований, отражающих функциональные возможности релаксометра. Рассмотрены экспериментальные зависимости, характеризующие изменения амплитуды и фазы сигнала свободной индукции в однородном магнитном поле от скорости движения исследуемой жидкости вдоль плоских рамочных катушек датчика ЯМР. Результаты экспериментов подтвердили теоретические предпосылки о возможности измерения скорости течения жидкости посредством контроля фазы сигнала ЯМР в однородном поле Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nahn E.L.* // *J. Geophys. Res.* 1960. V.65. P.776–778.
2. *Бородин П.М.* // *ЖТФ.* 1964. Т. 34. С.1328–1336.
3. *Бородин П.М., Мельников А.В., Морозов А.А., Чернышев Ю.С.* Ядерный магнитный резонанс в земном поле. Ред. П.М. Бородин. Л. 1967.
4. *Пинегин Н.А., Вечерухин Н.М., Бакланов В.С., Чижик В.И.* // *Радиоспектроскопия.* Пермь. 1990. С.152–155.
5. *Бородин П.М., Мананкова А.В.* // *Журн. техн. физ.* 1972. Т. 42. С.676–679.
6. *Бородин П.М., Морозов А.А.* // *Ядерный магнитный резонанс.* Вып. 7. Ред. П.М. Бородин. Л. 1988. С.41–52.
7. *Бородин П.М.* // *Ядерный магнитный резонанс.* Вып. 5. Ред. П.М. Бородин. Л. 1974. С.46–54.
8. *Бородин П.М., Морозов А.А.* Авторское свидетельство № 1727084 от 26.08.92.
9. *Матвеева Н.П., Вечерухин Н.М.* // *Ядерный магнитный резонанс.* Вып. 7. Ред. П.М. Бородин. Л. 1988. С.136–140.
10. *Bene C.J.* // *Phys. Rep.* 1980. V.58, № 4. P.213–267.

NMR RELAXOMETER IN THE EARTH FIELD

P.M.Borodin, N.M.Vecherukhin

Research Institute of Physics of St.-Petersburg State University, Russia.

A device for observation of the NMR signal in the Earth field is described. This device provides information about the macroscopic motion of liquid due to the interaction of the magnetic nucleus moments of the moving liquid with the external magnetic field. The operation principle of the device measuring the flowrate of the liquid in study is based on detection of phase changes in the NMR signal (nucleus free induction decay) in the geomagnetic field. The theoretical possibility of flowrate measurement by the NMR signal in a homogeneous magnetic field has been proved experimentally.