

В. В. ДАВЫДОВ, В. И. ДУДКИН, А. Ю. КАРСЕЕВ

ПОЛЯРИЗАТОР ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ ТЕКУЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Рассматривается способ локального уменьшения времени продольной релаксации чистой воды в момент нахождения ее в поляризаторе. Приведены результаты экспериментального исследования одновременного влияния постоянного электрического и магнитного полей на время продольной релаксации при различных температурах чистой воды.

Ключевые слова: магнит-поляризатор, сосуд-поляризатор, намагниченность, время продольной релаксации, вязкость.

Введение. В соответствии с требованиями, предъявляемыми в настоящее время к измерительным устройствам, погрешность измерений не должна превышать 0,2—0,5 % [1]. Другим важным требованием, наряду с точностью, является надежность измерителей. Основной показатель надежности — время, в течение которого прибор сохраняет работоспособность при допустимой погрешности измерений. Это время зависит как от конструкции прибора, так и от его назначения и условий применения [2]. Третье требование — обеспечение диапазона измерений физической величины при допустимой погрешности [1, 3].

Ядерно-магнитные измерители физических величин, предназначенные для работы с потоком жидкости, обладают высокой степенью надежности благодаря отсутствию непосредственного контакта с исследуемой средой [4]. Однако для обеспечения точности измерений (при допустимой погрешности) такие измерители должны иметь устройство для эффективного намагничивания. Для полного намагничивания жидкая среда должна находиться в зоне действия магнитного поля в течение времени T_n , не меньшего чем $3T_1$, где T_1 — время продольной релаксации жидкости [5]. В случае нарушения соотношения между T_n и T_1 жидкость намагничивается не полностью [6]. При этом зависимость величины намагниченности жидкости от времени нахождения ее в магнитном поле (на интервале от 0 до $3T_1$) носит нелинейный характер [5, 7]. Максимальная крутизна кривой намагниченности текущей жидкости приходится на интервал от T_1 до $2T_1$. В этом случае, как правило, величина намагниченности составляет 30—80 % от максимально возможной для данного магнитного поля [5, 8, 9]. Если по каким-либо причинам (в основном из-за увеличения скорости протекания) жидкость в поляризаторе находится в течение времени, меньшего $2T_1$, это приводит к высокой погрешности измерений.

Точность измерений в таких приборах определяется отношением сигнал/шум в схеме регистрации сигнала ЯМР и связана как с однородностью магнитного поля в зоне расположения катушки регистрации, так и с величиной намагниченности жидкости [10, 11]. Однородность магнитного поля в зоне расположения катушки регистрации сигнала ЯМР — постоянная величина, так как влияние внешних воздействий устраняется конструктивными осо-

бенностями прибора; величина однородности может измениться только при значительном изменении температуры окружающей среды, что приведет к разогреву магнитов. Поэтому отношение сигнал/шум в схеме регистрации сигнала ЯМР в основном будет определяться величиной намагниченности жидкой среды и временем действия релаксационных процессов при протекании жидкости от поляризующей магнитной системы до катушки регистрации сигнала ЯМР.

Намагничивание жидкости и релаксационные процессы. Амплитуда сигнала ЯМР в катушке регистрации пропорциональна величине намагниченности жидкой среды. Намагниченность жидкости, поступившей в катушку регистрации, описывается следующей формулой [5]:

$$M_p = \chi_0 H_n \left[1 - \exp\left(-\frac{V_n}{qT_1}\right) \right] \exp\left(-\frac{V_{тр}}{qT_1}\right), \quad (1)$$

где χ_0 — статическая ядерная магнитная восприимчивость; H_n — напряженность поля в зазоре магнита-поляризатора, V_n — объем сосуда-поляризатора жидкости; q — расход жидкости; $V_{тр}$ — объем соединительного трубопровода между поляризатором и катушкой регистрации.

Согласно выражению (1) существует оптимальный расход жидкости $q_{опт}$, при котором величина намагниченности максимальна. Отклонение от значения $q_{опт}$ приводит к уменьшению намагниченности, что автоматически уменьшает амплитуду регистрируемого сигнала ЯМР. Уменьшение величины M_p вследствие уменьшения или увеличения q до значения, при котором отношение сигнал/шум становится меньше трех, для проведения измерений в реальном времени недопустимо (погрешность измерения превышает 1 %). По значениям расхода q_1 и q_2 , при которых отношение сигнал/шум равно трем, определяется динамический диапазон измерения физической величины.

В связи с тем, что в технологических процессах часто используются потоки жидкости с большими расходами, при измерениях возникают проблемы, связанные с неполным намагничиванием жидкости. В настоящее время технологии создания принципиально новых высокоэнергетичных магнитных материалов практически себя исчерпали. Поэтому одним из обоснованных решений увеличения намагниченности для турбулентного потока жидкости с большим расходом является локальное уменьшение времени продольной (спин-решеточной) релаксации жидкости в момент нахождения ее в магнитной системе.

Для реализации этой задачи авторами предложен способ локального уменьшения времени релаксации T_1 и проведена его экспериментальная проверка. Для формирования турбулентного потока жидкости в момент нахождения ее в магнитной системе разработана конструкция сосуда-поляризатора.

Методика эксперимента. В качестве жидкой среды в эксперименте использовалась чистая вода (водопроводная вода, очищенная от механических примесей) комнатной температуры. Выбор в пользу чистой воды сделан, в первую очередь, вследствие изученности и простоты данной среды, а также достаточно большого времени продольной релаксации $T_1=3,6$ с при комнатной температуре (около 20 °С) по сравнению с другими жидкими средами. Кроме того, при незначительных колебаниях (± 2 °С) комнатной температуры (что может происходить во время эксперимента) изменения T_1 незначительны [12].

Механизм формирования времени релаксации T_1 для чистой воды обусловлен вращательным и поступательным (трансляционным) движением ее молекул, вызванным диполь-дипольным взаимодействием протонов [13]. Экспериментально установлено, что вклад в величину T_1 при вращательном движении молекул в три раза больше, чем при поступательном.

Время продольной релаксации для жидких сред, содержащих молекулы с двумя одинаковыми спинами, равными $1/2$, рассчитывается по следующей формуле [10, 13]:

$$T_1 = \frac{kt}{2\pi h^2 \gamma^4 \eta} \left(\frac{b^6}{a^3} + \frac{5}{3\pi N} \right), \quad (2)$$

где t — температура воды; a — радиус твердой сферы, при котором молекула аппроксимируется по формуле Стокса; b — расстояние между протонами; N — число протонов в 1 см^3 ; η — вязкость воды; k — постоянная Больцмана; h — постоянная Планка; γ — гиромагнитное отношение.

При постоянных значениях температуры и скорости потока жидкости изменение T_1 будет связано с изменением вязкости или факторами, влияющими на нее [10, 13].

Метод, позволяющий сократить время релаксации при нахождении жидкости в сосуде-поляризаторе, разработан с учетом особенностей строения молекулы воды, а также механизмов формирования времени T_1 . Для этих целей была разработана новая конструкция устройства намагничивания жидкости — поляризатора, структурная схема которого приведена на рис. 1, где 1 — полюсы постоянного магнита; 2 — сосуд-поляризатор; 3 — проводящие пластинки; 4 — участок трубопровода; 5 — изолирующие прокладки; 6 — источник постоянного напряжения.

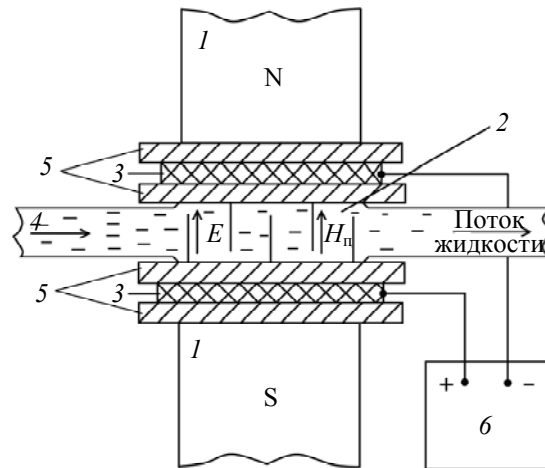


Рис. 1

В разработанной конструкции между полюсными наконечниками постоянного магнита с $B_n = 0,862 \text{ Тл}$ ($H_n = 685\,954 \text{ А/м}$) расположены две пластинки, на которые подается постоянное напряжение U . Расстояние между пластинками 14 мм. В результате в сосуде-поляризаторе, расположенном между пластинками, на поток чистой воды оказывает воздействие, кроме постоянного магнитного поля, еще и постоянное электрическое поле. Под действием сильного электрического поля изменяется средняя ядерная конфигурация молекул: электрический дипольный момент молекул воды выстраивается по полю E , а также смещаются электронные облака отрицательного заряда в пространстве вокруг ядер [13, 14].

Для того чтобы наблюдать уменьшение T_1 , необходимо, регулируя расход воды, переместить „точку регистрации“ сигнала ЯМР на спадающий участок кривой намагниченности [11, 15]. Было установлено, что при таком расходе для данного трубопровода в диапазоне температур от 15 до $26 \text{ }^\circ\text{C}$ число Рейнольдса превышает 3000. Это означает, что поток жидкости — турбулентный [16]. В этом случае основное влияние на вязкость потока чистой воды оказывает динамический коэффициент турбулентной вязкости η_t . При дальнейшем увеличении скорости и температуры потока влияние других компонентов вязкости снижается [16].

Для создания турбулентного потока при малых расходах жидкости и низких температурах в разработанной конструкции магнита-поляризатора реализована новая конструкция сосуда-поляризатора. В этом сосуде турбулентность создается перемешиванием двух встречных

потоков, что допустимо при небольших скоростях потока жидкости [16]. На рис. 2 представлена конструкция сосуда-поляризатора со схемой течения жидкости. Измерения показали, что гидравлические потери при использовании данной конструкции увеличатся на 6—7 % по сравнению с потерями при применении классической конструкции.

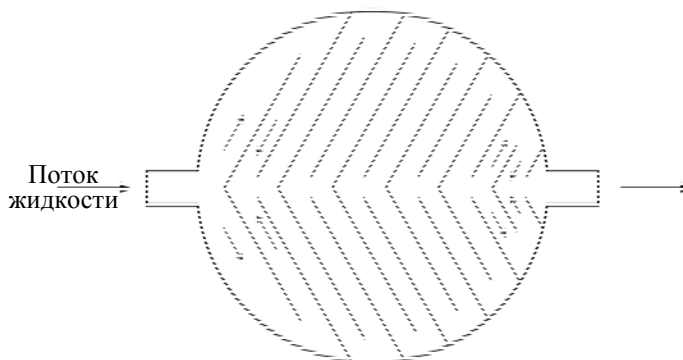


Рис. 2

Турбулентная вязкость сложным образом зависит от многих параметров потока, в частности от турбулентной пульсации скорости, на которую влияют энергии вращения и колебания в молекуле [14, 16]. В сильном электрическом поле увеличивается дипольный момент молекулы, что приводит к уменьшению этих энергий [14].

Для нескольких значений комнатной температуры (при этих температурах омагниченную чистую воду используют для производства „тяжелой“ воды и приготовления биологических растворов) было исследовано влияние электрического поля на время продольной релаксации T_1 . Для измерений T_1 с минимальной погрешностью экспериментальная установка была сконструирована таким образом, чтобы все измерения проводились при оптимальном расходе жидкости $q_{\text{опт}}$ и отношении сигнал/шум, равном 40 и выше. В соответствии со стандартной методикой, используемой, например, в минитографах при измерении времени релаксации [17], цикл измерения времени продольной релаксации повторялся 10 раз для усреднения данных по значениям T_1 и оценки погрешности измерения. На рис. 3 представлены полученные зависимости для различных значений температуры потока чистой воды: 1 — $t = 16,2$ °C; 2 — $t = 19,4$ °C; 3 — $t = 25,1$ °C.

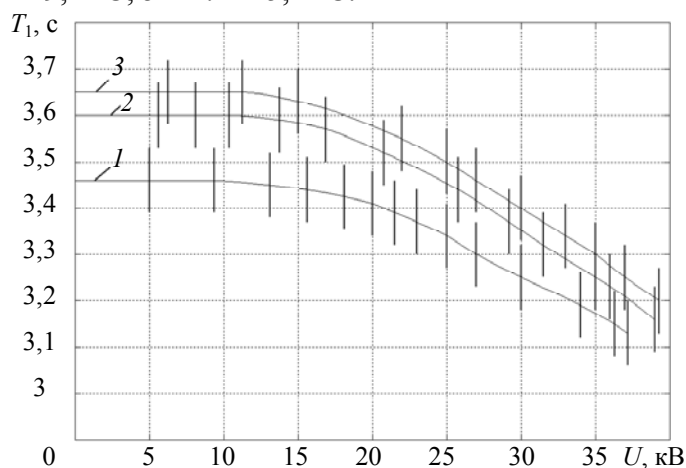


Рис. 3

На основе полученных экспериментальных результатов можно сделать следующий вывод: под действием сильного электрического поля (близкого по величине напряжению пробоя воздуха) значение T_1 уменьшается, что позволяет его достоверно зарегистрировать. Экспериментальные данные согласуются с теоретическими представлениями о том, что при увеличении температуры чистой воды измеренные величины T_1 при одинаковом воздействии электрического поля будут увеличиваться.

Заключение. Предложенный метод и разработанные конструкции поляризатора и сосуда-поляризатора представляют интерес и для практики, и для физики магнитных явлений. При этом надежность модифицированного прибора не ухудшилась.

Кроме того, перспективными представляются исследования по структуре льда, полученного из чистой воды, подвергшейся одновременному воздействию электрического и магнитного полей. Такой лед может быть получен, например, путем быстрой заморозки чистой воды сразу после воздействия на нее этих полей на выходе из поляризатора как в кювете, так и в ответвлении трубопровода. Лед представляет собой поликристаллическое тело, в котором кристаллическая структура определяется строением молекул воды и некоторыми ее макроскопическими свойствами — вязкостью, модулем упругости и др. [18]. Значительное уменьшение времени продольной релаксации T_1 в жидкой среде, связанное с увеличением вязкости среды, может вызвать изменения в кристаллической структуре льда.

В настоящее время известны 3 аморфные разновидности и 15 кристаллических модификаций льда. Возможное появление новых модификаций льда представляет как научный, так и практический интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабардина С. И., Шефер Н. И. Измерения физических величин. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2009. 152 с.
2. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. М.: Лань, 2005. 112 с.
3. Davydov V. V. Applying of nuclear-magnetic flowmeter-relaxometer for sewage control // Thes. of the 6th Intern. Youth Environmental Forum "ECOBALTICA'2006". St. Petersburg, 2006. P. 142.
4. Давыдов В. В., Семенов В. В. Нестационарный режим работы нутационных ЯМР расходомеров и магнитометров // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 3. С. 151—153.
5. Жерновой А. И., Латышев Г. Д. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. М.: Атомиздат, 1964. 254 с.
6. Жерновой А. И., Стасевич В. М. Расходомер жидкости на принципе ЯМР // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1965. Т. 8, № 2. С. 6—30.
7. Брановер Г. Г., Циннобер А. Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. М.: Наука, 1970. 380 с.
8. Davydov V. V. The different work regimes of the nutation nuclear-magnetic flowmeter // Contemporary Technical Physics, J. of Boston Phys. Soc. 1998. Vol. 9, N 3. P. 74—77.
9. Давыдов В. В. Влияние неоднородного магнитного поля на время продольной релаксации T_1 текущей жидкости // Инженерно-физич. журн. 2000. Т. 73, № 4. С. 819—822.
10. Лёше А. Ядерная индукция. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 678 с.
11. Жерновой А. И. Ядерно-магнитные расходомеры. Л.: Машиностроение, 1985. 136 с.
12. Davydov V. V. The calculation relaxation times T_1 and T_2 for flow liquid // Intern. J. of Modern Physics. 1998. Vol. 7, N 9. P. 798—801.
13. Абрагам А. Ядерный магнетизм. М.: Изд-во иностр. лит., 1967. 686 с.
14. Татевский В. В. Строение молекул. М.: Химия, 1977. 512 с.
15. Давыдов В. В., Дудкин В. И. Режим работы меточного ЯМР-расходомера на основе эффекта параметрического резонанса // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45, № 5. С. 49—51.
16. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
17. Марусина М. Я., Нейронов Ю. И. Метод определения времени релаксации протонов моторного масла и возможности его практического использования // Науч. приборостроение. 2010. Т. 20, № 2. С. 37—41.
18. Богородский В. В., Гаврилов В. П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 584 с.

Сведения об авторах

- Вадим Владимирович Давыдов** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра квантовой электроники;
E-mail: davydov_vadim66@mail.ru
- Валентин Иванович Дудкин** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра квантовой электроники;
E-mail: vidoodkin@mail.ru
- Антон Юрьевич Карсеев** — студент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра квантовой электроники;
E-mail: antonkarseev@gmail.com

Рекомендована кафедрой
квантовой электроники

Поступила в редакцию
02.10.13 г.