

УДК 539.183

А.Ю. Карсеев, В.В. Давыдов, В.И. Дудкин

ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕНИ СПИН-РЕШЕТОЧНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЧИСТОЙ ВОДЫ СИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

A.Yu. Karseev, V.V. Davydov, V.I. Dudkin

St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

THE VARIATION OF THE DISTILLED WATER SPIN-LATTICE RELAXATION TIME IN TURBULENT STREAM BY THE STRONG ELECTRICAL FIELD

Рассмотрены проблемы омагничивания чистой воды для производства тяжелой воды. Экспериментально исследовано одновременное влияние постоянного электрического и магнитного полей на время спин-решеточной релаксации T_1 при различных значениях температуры чистой воды.

ВРЕМЯ СПИН-РЕШЕТОЧНОЙ РЕЛАКСАЦИИ. ЧИСТАЯ ВОДА. ТЯЖЕЛАЯ ВОДА. ТЕКУЩИЙ ПОТОК. ОМАГНИЧИВАНИЕ.

The problems of distilled water magnetizing for the heavy water production are considered. The simultaneous effect of constant magnetic and electric fields on the T_1 spin-lattice relaxation time for distilled water at different temperatures are investigated experimentally.

SPIN-LATTICE RELAXATION TIME. DISTILLED WATER. HEAVY WATER. FLOWING STREAM. MAGNETIZING.

Различным отраслям промышленности с каждым годом требуется все больше и больше воды, причем в некоторых случаях вода должна пройти предварительную подготовку. Эта жидкость, как известно, отличается от других по целому ряду аномальных свойств, обусловленных особенностями ее структуры [1].

Эти особенности определяются не просто полярными свойствами молекул воды, но и характером распределения электронной плотности. Каждая из молекул имеет два некомпенсированных положительных заряда у атомов водорода, а также два отрицательных, ввиду наличия неподеленной p -электронной пары кислорода. Данные заряды расположены практически по углам тетраэдра, что позволяет каждой молекуле воды образовывать четыре водородные связи с соседями, причем с точным балансом числа донорных и акцепторных связей и с направлениями, близкими к опти-

мальным для таких связей, т. е. практически с максимальной для них энергией [1].

В атомной энергетике в качестве охлаждающей жидкости используют тяжелую воду D_2O . В последние годы в МАГАТЭ разработана методология комплексной оценки инновационных ядерных энергетических систем (ИЯЭС) в рамках международного проекта «Инновационного развития ядерных реакторов и замкнутого ядерного топливного цикла» ИНПРО. По этой программе разрабатывается новая конструкция реактора, позволяющая вовлечь в цикл получения энергии изотопы урана-238 и тория-232, обеспечив при этом полное замыкание топливного цикла, с большим сокращением добычи природной сырьевой компоненты и отправки отработанного ядерного топлива в «могильники» [2].

Как показали предварительные исследования, для атомных станций будущего потребуются значительно больше тяжелой воды, чем



производится сейчас. В настоящее время для ее производства используется проточная омагниченная вода. Устройство омагничивания содержит сосуд, помещенный между полюсами магнита. Эффект омагничивания зависит как от времени нахождения воды в зазоре магнитной системы, так и от напряженности магнитного поля H в этом зазоре.

В настоящее время технологии по созданию принципиально новых магнитных систем, имеющих высокое значение постоянного магнитного поля в зазоре между полюсными наконечниками, себя почти исчерпали. В связи с этим, единственным и экономически оправданным решением для увеличения степени намагниченности быстрого (турбулентного) потока чистой воды является локальное уменьшение времени продольной (спин-решеточной) релаксации T_1 в момент ее нахождения в магнитной системе.

Постановка задачи

Механизм формирования времени релаксации T_1 в воде обусловлен вращательным и поступательным (трансляционным) движением ее молекул, вызванным диполь-дипольным взаимодействием протонов [3]. Экспериментально установлено, что вклад от вращательного движения в величину T_1 в три раза больше, чем от поступательного. Кроме того, время продольной релаксации T_1 чистой воды обладает характерной зависимостью от температуры [4, 5]. Поэтому необходимо было решить следующие задачи:

измерить время продольной релаксации T_1 чистой воды в диапазоне температур от 0 до 100 °С;

разработать способ локального уменьшения времени продольной релаксации T_1 и провести соответствующую экспериментальную проверку для чистой воды в быстром потоке в момент ее нахождения в магнитной системе с фиксированием изменения значения T_1 .

Результаты экспериментальных исследований

Для измерения температурной зависимости T_1 для чистой воды была использована разработанная ранее экспериментальная установка на основе схемы меточного ядерного магнитного резонансного расходомера [6]. Для более точного измерения значения T_1 в текущем потоке (двумя методами) в ее конструкцию включили переменный объем [7].

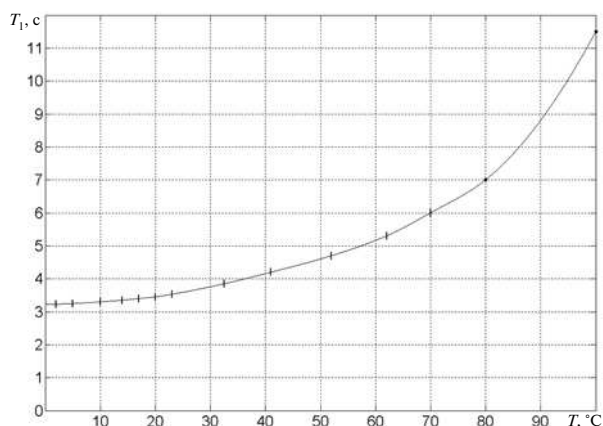


Рис. 1. Экспериментальная зависимость времени продольной релаксации T_1 чистой воды от температуры

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость, полученная в результате измерений различными методами.

Сравнивая полученные нами значения T_1 для чистой воды с опубликованными ранее в работах [3 – 5], а также с результатом, представленным в работе [8], где время продольной релаксации чистого льда $T_1 = 3,2$ с при $T = -1,5$ °С, можно убедиться в том, что в контрольных точках полученные нами значения совпадают с измеренными ранее. Характер экспериментально измеренной зависимости для T_1 отражает физические процессы, происходящие при изменении температуры в чистой воде.

С учетом особенностей структуры молекулы воды и механизма формирования T_1 был предложен метод, позволяющий сократить время продольной релаксации чистой воды за время ее нахождения в сосуде-поляризаторе. Для этих целей была разработана новая конструкция магнита-поляризатора (рис. 2).

В разработанной конструкции между полюсными наконечниками магнита были расположены две пластинки, на которые подавалось постоянное напряжение U . Расстояние между пластинками составляло 14 мм. В качестве источника постоянного напряжения (ИПН) использовался прибор CPR-3000H05D. В результате на участке трубопровода, расположенного между этими пластинками, на поток чистой воды помимо постоянного магнитного поля оказывает дополнительное воздействие постоянное электрическое поле. Под действием сильного

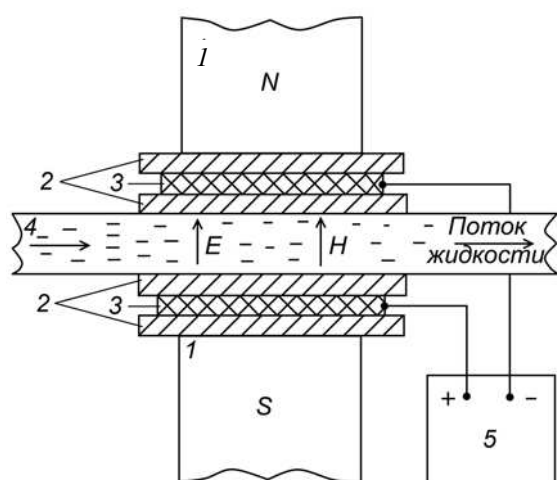


Рис. 2. Структурная схема поляризатора: 1 – полюса постоянного магнита; 2 – изолирующие прокладки; 3 – проводящие пластины; 4 – участок трубопровода, 5 – источник постоянного напряжения

электрического поля изменится средняя ядерная конфигурация молекул: электрический дипольный момент молекул воды выстроится по полю E , а также сместятся электронные облака отрицательного заряда в пространстве вокруг ядер [1, 3].

Время продольной релаксации T_1 для жидких сред, содержащих молекулы с двумя одинаковыми спинами, равными $1/2$, рассчитывается по следующей формуле [3, 9]:

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

где T – температура воды; a – радиус твердой сферы, который аппроксимирует молекулу по формуле Стокса; b – расстояние между протонами; N – число протонов в 1 см^3 ; η – вязкость.

При постоянном значении температуры изменение T_1 связано с изменением вязкости или факторами, на нее влияющими [3, 9]. Для того, чтобы наблюдать уменьшение T_1 , необходимо путем регулирования расхода воды переместить «точку регистрации» сигнала ЯМР на спадающий участок кривой намагниченности [5, 6]. При такой величине расхода для данного трубопровода в диапазоне температур от 10 до 30 °C число Рейнольдса превышает значение в 3000. Это означает, что поток жидкости – турбулентный [10]. В этом случае основной вклад в величину вязкости потока чистой воды дает динамический коэффициент тур-

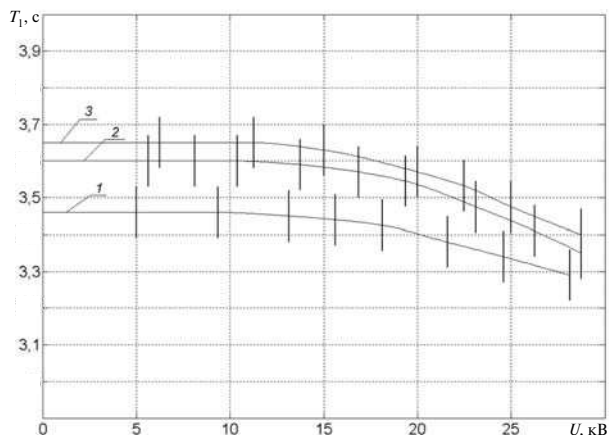


Рис. 3. Зависимость времени продольной релаксации от постоянного напряжения, приложенного к пластинам, для различных значений температуры потока чистой воды T , °C: 16,2 (1); 19,4 (2); 25,1 (3)

булентной вязкости η^t . С увеличением скорости и температуры потока вклад остальных компонент вязкости становится несущественным [10].

Турбулентная вязкость сложным образом зависит от многих факторов потока, в частности от турбулентной пульсации скорости, которая зависит от энергий вращения и колебания в молекуле [1, 10]. В сильном электрическом поле у молекулы увеличивается дипольный момент, что приводит к уменьшению этих энергий [1].

Для трех значений комнатной температуры (в этом диапазоне чистая вода используется для производства тяжелой воды и приготовления биологических растворов) было исследовано влияние электрического поля на время продольной релаксации T_1 . На рис. 3 представлены данные зависимости.

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что приложенное сильное электрическое поле (близкое по величине к напряжению пробоя воздуха) уменьшило значение T_1 настолько, что его удалось достоверно зарегистрировать. Экспериментальные данные согласуются с теоретическими представлениями, согласно которым при увеличении температуры чистой воды изменение величины T_1 будет большим при одном о том же воздействии.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены результаты, представляющие большой интерес как для практики, так и для физики магнитных явлений.



Наибольший интерес представляет полученный результат для проведения дальнейших исследований структуры льда, полученного из воды, обработанной одновременно электрическим и магнитным полями. Такой лед можно получить, например, путем быстрого замораживания чистой воды сразу после одновременного воздействия на нее магнитного и электрического полей на выходе из поляризатора как в кювете, так и в ответвлении трубопровода.

Лед представляет собой поликристаллическое тело, состоящее из множества кристаллов неправильной формы, называемых зернами. Зерна состоят из упорядоченных в пространстве однотипных элементарных ячеек, образу-

ющих кристаллическую решетку. Существует много типов решеток. Кристаллическая структура льда определяется строением молекул воды и некоторыми ее макроскопическими свойствами: вязкостью, модулем упругости и др. [11].

Уменьшение времени продольной релаксации T_1 в жидкой среде, связанное с увеличением вязкости этой среды, может вызвать изменения в кристаллической структуре льда [4, 10].

В настоящее время известны три аморфных разновидности и 15 кристаллических модификаций льда. Возможное появление новых модификаций льда вызывает как научный, так и практический интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Татевский, В.В.** Строение молекул [Текст] / В.В. Татевский. – М.: Химия, 1977. – 512 с.
2. **Велихов, Е.П.** Развитие ядерной и термоядерной энергетики [Текст] / Е.П. Велихов // Санкт-Петербургский научный форум «Наука и общество» и «Наука и прогресс человечества»: VII Петербургская встреча лауреатов Нобелевской премии. Тез. пленарн. докл.; Санкт-Петербург, 8 – 12 октября, 2012. – С. 16.
3. **Абрагам, А.** Ядерный магнетизм [Текст] / А. Абрагам. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1967. – 686 с.
4. **Жунке, А.** Ядерный магнитный резонанс в неорганической химии [Текст] / А. Жунке. – М.: Мир, 1974. – 284 с.
5. **Жерновой, А.И.** Ядерно-магнитные расходомеры [Текст] / А.И. Жерновой. – Л.: Машиностроение, 1985. – 136 с.
6. **Давыдов, В.В.** Режим работы меточного ЯМР-расходомера на основе эффекта параметрического резонанса [Текст] / В.В. Давыдов, В.И. Дудкин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2002. – № 5. – С. 49 – 51.
7. **Davydov, V.V.** The chemical factory sewage control by nuclear-magnetic relaxometer [Text] / V.V. Davydov, A.V. Dolgopolo, P.V. Matveev // The 7th International Youth Science Environmental Forum «ECOBALTI-SA'2008». Proceedings. St. Petersburg, June 26 – 28, 2008. – P. 269 – 270.
8. **Ранелс, Л.К.** Явление диффузии и релаксации во льду: Физика льда [Текст] / Л.К. Ранелс // Обзор докл. Междунар. симп. 9–14 сентября 1968 г., Мюнхен. – Л.: Лениздат, 1973. – 124 с.
9. **Лёше, А.** Ядерная индукция [Текст] / А. Лёше. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 678 с.
10. **Гиргидов, А.Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст] / А.Д. Гиргидов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 545 с.
11. **Богородский, В.В.** Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии [Текст] / В.В. Богородский, В.П. Гаврилов. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 584 с.

КАРСЕЕВ Антон Юрьевич – студент радиофизического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
antonkarseev@gmail.com

ДАВЫДОВ Вадим Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
davydov_vadim66@mail.ru

ДУДКИН Валентин Иванович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vidoodkin@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013