

УДК 537.636; 54.03; 544.275.2

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НЕКОТОРЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

© 2020 г. Академик РАН И. А. Щербаков^{1,*}, И. В. Баймлер¹, С. В. Гудков¹, Г. А. Ляхов¹, Г. Н. Михайлова¹, В. И. Пустовой¹, Р. М. Саримов^{1,**}, А. В. Симакин¹, А. В. Троицкий¹

Поступило 24.04.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принято к публикации 02.06.2020 г.

Исследовано влияние постоянного магнитного поля с индукцией до 7 Тл на концентрацию растворенного молекулярного кислорода, концентрацию пероксида водорода, окислительно-восстановительный потенциал и удельную электропроводность водных растворов с низкой концентрацией активных примесей. Показано, что концентрация растворенного молекулярного кислорода в воде при действии магнитного поля с индукцией до 7 Тл существенно не изменяется, тогда как концентрация пероксида водорода испытывает линейный рост. Установлено, что водородный показатель рН воды с усилением поля в этом диапазоне индукций имеет тенденцию к уменьшению в пределах 10%. При увеличении индукции наблюдается рост показателя окислительно-восстановительного потенциала воды. Изменение его значения составляет примерно 7 мВ/Тл. Показано, что с увеличением индукции до 2 Тл удельное электрическое сопротивление исследуемой воды падает примерно до 0.6 МОм · см, а при более высоких значениях индукции практически не изменяется.

Ключевые слова: вода, постоянное магнитное поле, растворенный молекулярный кислород, перекись водорода, окислительно-восстановительный потенциал, удельная электропроводность, водородный показатель рН

DOI: 10.31857/S2686740020040136

Существует значительное число технологий, которые используют постоянные магнитные поля. В биохимических и биомедицинских технологиях едва ли не обязательным компонентом служат водные растворы. Для расширения их возможностей перспективным представляется исследование влияния магнитных полей с доступными значениями индукции на свойства таких растворов. В связи с тем, что эффективно проявили себя оптические методы определения свойств водных растворов, отметим примеры экспериментов по изучению влияния магнитных полей на оптические параметры воды. Было обнаружено, что в диапазоне индукций около сотен миллитесла ИК-полосы воды испытывают лишь незначительные изменения интенсивности [1, 2]. Только при индукции 14 Тл обнаруживаются небольшие их спектральные сдвиги, которые авторы связывают с образованием водородных связей [2]. В полях с индукцией от 1 до 10 Тл был обнаружен рост показателя преломления воды [3]. Эффект магнитных полей

наблюдался при временах экспозиции магнитного поля от 1 до 5 мин [4–6], а время фиксации эффекта после завершения магнитного воздействия составляло десятки минут [6]. Эти результаты дают представление о временных порядках действия магнитного поля. В настоящей работе исследовано влияние постоянного магнитного поля в диапазоне индукций от 1 до 7 Тл на концентрацию растворенного в воде молекулярного кислорода, пероксида водорода, водородный показатель рН, окислительно-восстановительный потенциал (редокс-потенциал) и удельное электрическое сопротивление водного раствора.

В экспериментах использована деионизованная Milli-Q вода с исходным удельным сопротивлением 18 МОм · см при 25°C. Точней было бы, по нашему мнению, и в этом случае называть исследуемый объект водным раствором: даже в максимально очищенной воде присутствуют естественные примеси в низких, но конечных концентрациях [7], например, молекулы растворенных атмосферных газов и активные формы кислорода. Ограничение снизу их естественных концентраций определяют, в частности, цепи реакций со слабой, вообще говоря, обратимостью, в которых участвуют в качестве основных молекулы воды и пероксида водорода, а также молекулы кислорода в возбуж-

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, Москва, Россия

* E-mail: ivan11444@mail.ru

** E-mail: rusa@kapella.gpi.ru

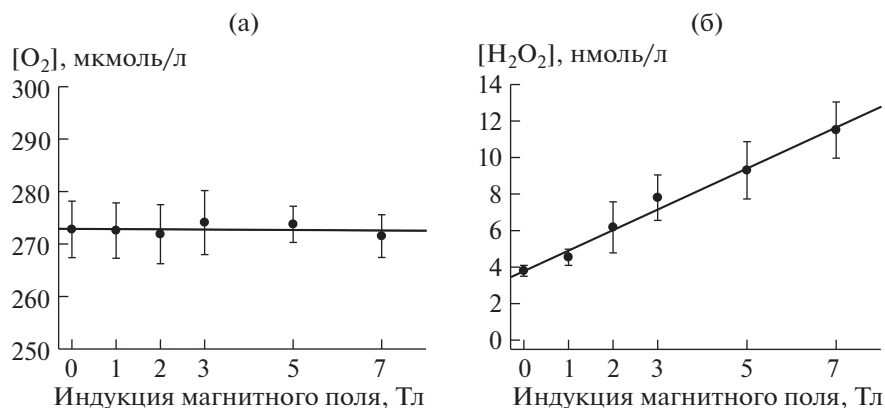


Рис. 1. Влияние индукции магнитного поля на концентрацию молекулярного кислорода (а) и пероксида водорода (б) в воде. Приведены средние значения и стандартные ошибки среднего для 4 независимых экспериментов.

денном синглетном состоянии. Эти естественные примеси влияют на физико-химические свойства воды, в частности, на ее удельное электрическое сопротивление.

Воздействие магнитным полем происходило в установке [8], которая представляет собой криостат со сверхпроводящим соленоидом из NbTi с теплым полем, охлаждаемый с помощью ступенчатого криорефрижератора Гиффорда–Макмагона (Sumitomo, Япония). На оси соленоида располагается экспериментальная камера, в которой помещаются исследуемые образцы раствора при комнатной температуре. Магнит позволяет получать магнитное поле с индукцией до 8 Тл. Размер поперечной области однородного поля в соленоиде составляет по вертикали примерно 25 мм. В эту область помещался объект исследования, содержа-

щий 25 мл водного раствора в 50-мл пластиковой пробирке.

Исследовано, прежде всего, влияние индукции магнитного поля на концентрацию молекулярного кислорода, растворенного в воде, которая находится в контакте с атмосферным газом пробирки (рис. 1а). Измерения показали, что магнитное поле в исследованном диапазоне индукций не влияет на концентрацию растворенного в жидкости молекулярного кислорода. Детали схемы этих измерений описаны в [9]. Этот результат достаточно очевиден, однако он может послужить одним из базовых для кинетического исследования, например, генерации пероксида водорода и активных форм кислорода под различного рода внешними воздействиями [10].

Концентрация пероксида водорода определялась методом усиленной хемолюминесценции, чувствительность метода составляет 0.1 нмоль/л [10]. В исходном водном растворе содержалось 4 нмоль/л пероксида водорода. С увеличением индукции магнитного поля наблюдается линейный рост концентрации пероксида водорода (рис. 1б). При увеличении индукции поля на 1 Тл концентрация пероксида водорода увеличивается на 1 нмоль/л. Ранее показано, что механическое воздействие, а именно турбулентное перемешивание водного раствора, вызывает рост концентрации пероксида водорода на величины такого же порядка [10].

Для измерения pH и окислительно-восстановительного потенциала использовали pH-метр-ионометр-БПК-термооксиметр “Эксперт-001” (Эконикс, Россия) с внутренним электродом сравнения. Получена зависимость pH от индукции магнитного поля (рис. 2). Рисунок 2 показывает, что при увеличении индукции обнаруживается тенденция к уменьшению pH. Учитывая связь показателя pH с концентрацией протонов ($\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$), можно сделать вывод о том, что изменения этой концен-

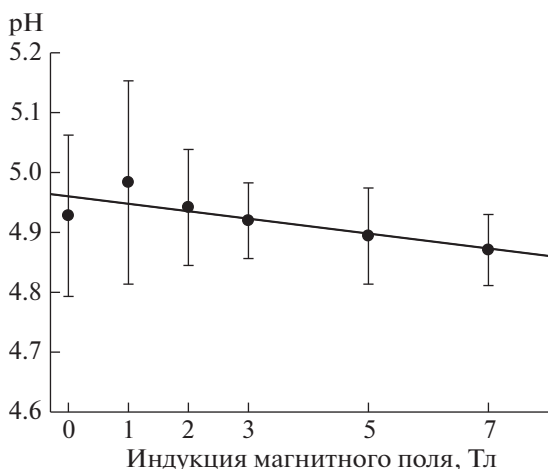


Рис. 2. Влияние индукции магнитного поля на водородный показатель воды (pH). Приведены средние значения и стандартные ошибки среднего для 4 независимых экспериментов.

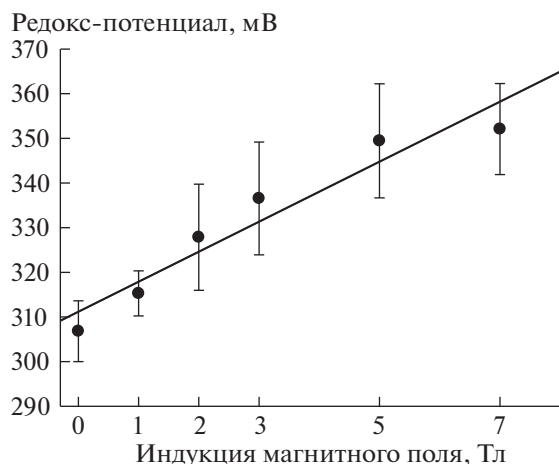


Рис. 3. Влияние индукции магнитного поля на показатель окислительно-восстановительного потенциала (редокс-потенциал) воды. Приведены средние значения и стандартные ошибки среднего для 4 независимых экспериментов.

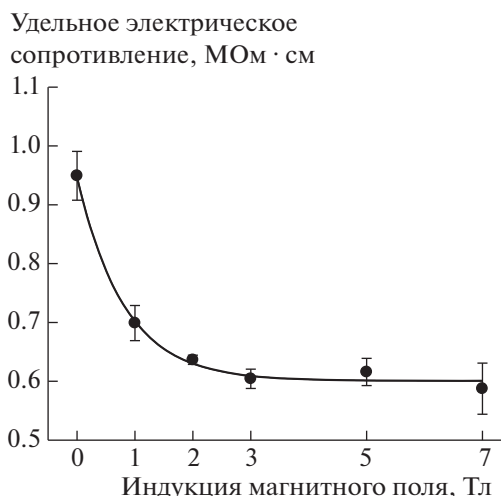


Рис. 4. Влияние индукции магнитного поля на удельное электрическое сопротивление воды. Приведены средние значения и стандартные ошибки среднего для 4 независимых экспериментов.

трации при увеличении индукции от 0 до 7 Тл могут достигать в водном растворе до 10%.

Зависимость показателя окислительно-восстановительного потенциала воды от индукции магнитного поля представлена на рис. 3. Этот показатель в исходном образце воды равен 307 мВ. С увеличением индукции показатель растет по линейному закону. Согласно данным рис. 3 изменения потенциала составляют 7 мВ/Тл.

Измеренная зависимость удельного электрического сопротивления водного раствора от индукции магнитного поля представлена на рис. 4. Водный раствор, насыщенный атмосферными газами, в отсутствие поля имеет удельное сопротивление 0.95 МОм·см. При увеличении индукции до 2 Тл оно падает до 0.6 МОм·см. При индукциях больше 2 Тл удельное сопротивление остается на этом постоянном уровне.

Изменение удельного сопротивления среды может происходить при изменении в ней числа носителей заряда, величины заряда этих носителей и средней скорости их движения. Этими параметрами управляют электрические поля, температура, а также кинетика диссоциации молекул воды и естественных примесей. Можно предположить, что в наших экспериментах основным фактором, влияющим на уменьшение удельного сопротивления водного раствора в области индукций магнитного поля меньше 2 Тл, является появление в растворе дополнительных протонов и анионов, связанных с растворением в воде атмосферного CO_2 . По-видимому, при определенной индукции магнитного поля наступает равновесие в процессах растворения CO_2 и образования протона, бикарбоната, угольной кислоты. Этим можно объ-

яснить неизменность величины удельного сопротивления при увеличении индукции магнитного поля больше 2 Тл.

Представленные здесь экспериментальные данные подготовлены к использованию для сравнительного анализа изменений физико-химических свойств водных растворов при внешних воздействиях другой природы — механических, акустических и электродинамических. Необходимо подчеркнуть, что при применении постоянного магнитного поля в технологиях, подразумевающих его взаимодействие с водными растворами, следует учитывать изменение свойств объекта исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pang X.F., Deng B. // *Physica B: Condensed Matter*. 2008. V. 403. P. 3571–3577.
2. Iwasaka M., Ueno S. // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 83. P. 6459–6461.
3. Hosoda H., Mori H., Sogoshi N., Nagasawa A., Nakabayashi S. // *J. Phys. Chem. A*. 2004. V. 108. P. 1461–1464.
4. Cai R., Yang H., He J., Zhu W. // *J. Mol. Struct.* 2009. V. 938. P. 15–19.
5. Wang Y., Wei H., Li Z. // *Results Phys.* 2018. V. 8. P. 262–267.
6. Holysz L., Szczes A., Chibowski E. // *J. Colloid Interface Sci.* 2007. V. 316. P. 996–1002.
7. Shcherbakov I.A. // *Phys. Wave Phenom.* 2020. V. 28 (2). P. 83–87.

8. *Shafeev G.A., Rakov I.I., Ayuzhу K.O., Mikhailova G.N., Troitskii A.V., Uvarov O.V.* // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 466. P. 477–482.
9. *Баймлер И.В., Гудков С.В., Саримов Р.М., Симакин А.В., Щербakov И.А.* Концентрационные зависимости молекулярного кислорода и водорода в водных растворах // ДАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 490. № 1. С. 9–12.
10. *Gudkov S. V., Lyakhov G. A., Pustovoy V. I., Shcherbakov I.A.* // Phys. Wave Phenom. 2019. V. 27(2). P. 141–144.

INFLUENCE OF A CONSTANT MAGNETIC FIELD ON SOME PROPERTIES OF WATER SOLUTIONS

Academician of the RAS **I. A. Shcherbakov^a, I. V. Baimler^a, S. V. Gudkov^a, G. A. Lyakhov^a, G. N. Mikhailova^a, V. I. Pustovoy^a, R. M. Sarimov^a, A. V. Simakin^a, and A. V. Troitsky^a**

^a*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

The effect of a static magnetic field with induction up to 7 T on the concentration of dissolved molecular oxygen, the concentration of hydrogen peroxide, the redox potential, and the electrical conductivity of aqueous solutions with a low concentration of active impurities is studied. It was shown that the concentration of dissolved molecular oxygen in water under the exposure of a magnetic field with induction up to 7 T does not change significantly, while the concentration of hydrogen peroxide increases linearly. It has been established that the pH value of water with field amplification in this induction range tends to decrease within 10%. With an increase in induction, an increase in the redox potential of water is observed. The change in its value is approximately 7 mV/T. It was shown that with an increase in induction up to 2 T, the electrical resistivity of the water under study drops to about 0.6 MΩ · cm, while at higher values of induction it practically does not change.

Keywords: water, static magnetic field, dissolved molecular oxygen, hydrogen peroxide, redox potential, electrical conductivity, potential hydrogen pH