ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ФИЗИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ, 2020, том 490, с. 9–12

ФИЗИКА

УДК 532.77-1

КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

© 2020 г. И. В. Баймлер[1,2], С. В. Гудков[1], Р. М. Саримов[1,*], А. В. Симакин[1], академик РАН И. А. Щербаков[1,**]

Поступило 21.11.2019 г.
После доработки 21.11.2019 г.
Принято к публикации 25.11.2019 г.

Исследуются концентрационные зависимости молекулярного кислорода и водорода в водных растворах при многократных разбавлениях и турбулентных перемешиваниях, сопровождающих процедуру разбавления. Деионизированную воду насыщали молекулярным водородом и молекулярным кислородом путем барботации. Измерение концентрации газов проводили полярографическими методами. Установлено, что при достижении некоторого числа разбавлений водного раствора концентрация примесей в водном растворе перестает зависеть от числа разбавлений. Возможность наблюдения этого эффекта определяется чувствительностью метода измерения. В водных растворах в условиях механического воздействия может происходить изменение их состава. Перемешивание стимулирует захват молекулярного кислорода из атмосферы. При турбулентном перемешивании эффект выражен сильнее, чем при ламинарном.

Ключевые слова: водные растворы, молекулярный кислород, молекулярный водород, турбулентное перемешивание

DOI: 10.31857/S2686740020010083

Максимально очищенная деионизированная вода, имеющая сопротивление 18 МОм/см, тем не менее является водным раствором, содержащим как минимум атмосферные газы, которые даже в небольших количествах способны влиять на свойства жидкости. Известно, что под действием внешних физических факторов свойства водных растворов также могут существенно изменяться. Так, в начале 1960-х гг. А.М. Прохоровым с сотрудниками экспериментально установлено неизвестное ранее явление возникновения гидравлического ударного импульса при поглощении внутри жидкости излучения лазера [5]. Было показано, что ударная волна образуется в результате кавитации пузырей, индуцированных лазерным излучением. При этом, как оказалось в дальнейшем, образуется молекулярный кислород, молекулярный водород и пероксид водорода [6].

Возникновение в жидкости пузырей происходит не только при воздействии лазерного излучения, но и при механических воздействиях [7]. Естественно предположить, что последствия могут быть аналогичными. Действительно, показано, что в водных растворах при турбулентном перемешивании происходит генерация пероксида водорода [8]. В [9] феномен образования пероксида водорода подтвержден при распылении капель микрометрового размера. Сведения об изменении концентрации молекулярного кислорода и водорода в водных растворах при механическом воздействии на них нам не известны.

В настоящей работе исследуются концентрационные зависимости молекулярного кислорода и водорода в водных растворах при многократных разбавлениях и турбулентных перемешиваниях, сопровождающих процедуру разбавления. Деионизированную воду насыщали молекулярным водородом путем барботации. В качестве источника молекулярного водорода использовали генератор водорода ГВЧ-6 (водород в генераторе получается путем электролиза, чистота получаемого водорода 99.995%). Барботирование проводили до полного насыщения водного раствора молекулярным водородом, также готовились растворы, содержащие необходимые концентрации молекулярного водорода. Контроль концентра-

[1]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия*
[2]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия*
**E-mail: rusa@kapella.gpi.ru*
***E-mail: ivan11444@mail.ru*

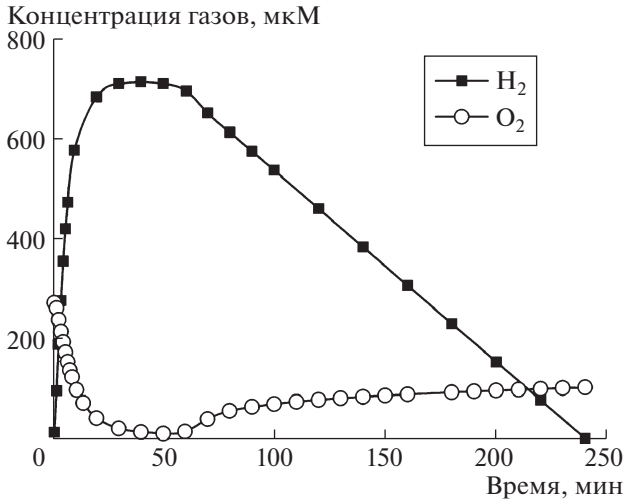

Рис. 1. Изменение концентрации растворенных в воде молекулярного водорода и молекулярного кислорода с течением времени при насыщении молекулярным водородом (до 60 мин) и после прекращения подачи молекулярного водорода. Механическое воздействие отсутствует.

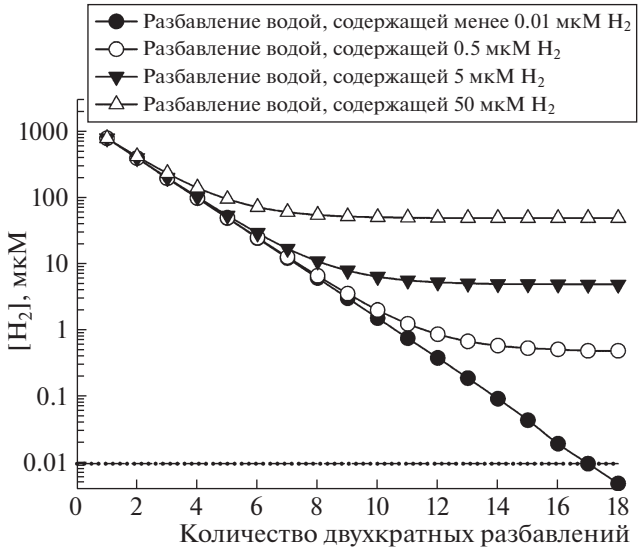

Рис. 2. Многократное разбавление водного раствора, насыщенного молекулярным водородом, водным раствором с фиксированным содержанием молекул водорода. Механическое воздействие отсутствует.

ции молекулярного водорода в водных растворах осуществляли с помощью портативного анализатора водорода АВП-02 (амперометрического сенсора).

В качестве растворов, насыщенных молекулярным кислородом, использовались образцы деионизированной воды, барботированные молекулярным кислородом. Концентрация молекулярного кислорода в насыщенных растворах достигала 800 мкМ. Измерение концентрации молекулярного кислорода проводили полярографическим методом с использованием кларковского электрода [10].

При насыщении молекулярным водородом воды максимум концентрации газа достигается за времена порядка 30 мин (рис. 1). При этом происходит вытеснение водородом растворенного в воде воздуха и, соответственно, уменьшение концентрации молекулярного кислорода до 10 мкМ. После отключения генератора (время порядка 60 мин) концентрация молекулярного водорода в воде начинает уменьшаться линейно с течением времени. Через 4 ч концентрация молекулярного водорода уменьшается с 700 до 50 мкМ, в то же время концентрация молекулярного кислорода монотонно увеличивается от 10 мкМ и достигает примерно 100 мкМ.

На рис. 2 представлены результаты, иллюстрирующие многократное разбавление водного раствора, насыщенного молекулярным водородом, водным раствором с фиксированным содержанием молекул водорода. Естественно, что концентрация примеси в конечном продукте не может быть меньшей, чем в растворителе, что и подтверждается в случае с молекулярным водородом. При этом возможность регистрации выхода на “плато” определяется чувствительностью аппаратуры, принципиально он должен иметь место всегда, так как идеальных растворителей не существует.

Рисунок 3 демонстрирует процесс многократного разведения водного раствора, насыщенного молекулярным кислородом. Концентрация молекулярного кислорода в растворяемом образце 800 мкМ. Заметно различие в концентрационной зависимости молекулярного кислорода от количества двукратных разбавлений при различном способе перемешивания. В частности, турбулентное перемешивание растворов, в отличие от ламинарного перемешивания, характеризуется большим значением концентрации молекулярного кислорода в растворе, при котором происходит выход на “плато”. Из приведенных на рис. 3 данных следует, что установившиеся концентрации молекулярного кислорода при многократном перемешивании в случае турбулентного и ламинарного промешивания составляют приблизительно 20 и 5 мкМ. Такое различие в концентрации можно связать с дополнительным растворением некоторой концентрации окружающего воздуха при турбулентном перемешивании.

Процесс увеличения концентрации молекулярного кислорода продемонстрирован на рис. 4. Для сравнения приведены данные по насыщению кислородом растворов: а) с концентрацией молекулярного кислорода, равной 100 мкМ, б) с концентрацией молекулярного кислорода, равной 5 мкМ. Установлено, что за счет диффузии кон-

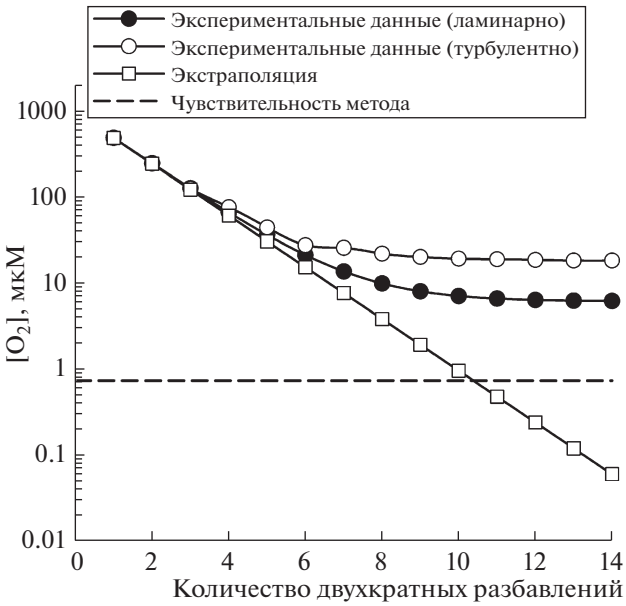

Рис. 3. Концентрационная зависимость молекулярного кислорода в одном растворе при многократных разбавлениях в условиях механического воздействия, приводящего к турбулентному или ламинарному движению жидкости (концентрация молекулярного кислорода в разбавителе менее 1 мкМ).

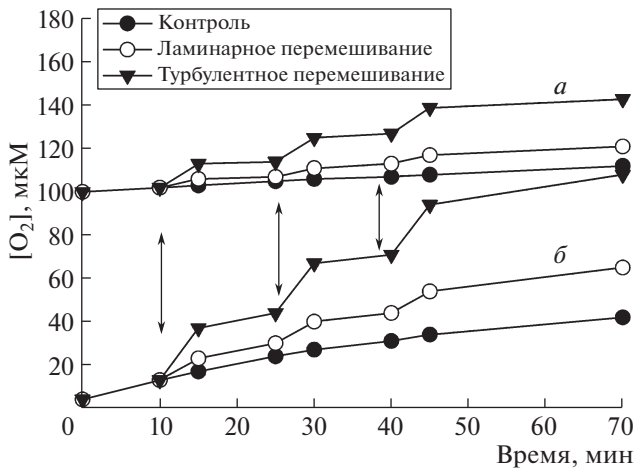

Рис. 4. Насыщение воды молекулярным кислородом воздуха. Интервалы, в которых происходило турбулентное и ламинарное перемешивание, обозначены вертикальными стрелками. *а* – изначальное содержание молекулярного кислорода 100 мкМ, *б* – изначальное содержание молекулярного кислорода 5 мкМ.

центрация молекулярного кислорода увеличивалась в контрольном образце с течением времени. Турбулентное перемешивание, в отличие от ламинарного, приводит к более быстрому изменению концентрации молекулярного кислорода в образце. Таким образом, при механическом воздействии на водные растворы примеси могут накапливаться в конечном продукте. Механизмы накопления могут быть различными, в случае молекулярного кислорода – это захват газа из атмосферы, в случае пероксида водорода – это генерация за счет аналога светогидравлического эффекта [8–10], для высокомолекулярных примесей накопление может происходить за счет процессов флотации [11] и агрегации [12].

Из представленной работы можно сделать несколько выводов. Во-первых, при достижении некоторого числа разбавлений водного раствора концентрация примесей в водном растворе перестает зависеть от числа разбавлений. Возможность наблюдения этого эффекта определяется чувствительностью метода измерения. Во-вторых, в водных растворах в условиях механического воздействия может происходить изменение их состава, наблюдается изменение концентраций таких молекул, как кислород, а также его активных форм. Механизмы накопления различны, например, перемешивание стимулирует захват молекулярного кислорода из атмосферы. При турбулентном перемешивании эффект выражен сильнее, чем при ламинарном. За генерацию пероксида водорода отвечает механический аналог светогидравлического эффекта [8].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 19–02–00061-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бункин Н.Ф., Бункин Ф.В.* // Усп. физ. наук. 2016. Т. 186. С. 933–952.
2. *Leeds A.R.* // J. Am. Chem. Soc. 1891. V. 132. P. 98–99.
3. *Rose S., Long A.* // Groundwater Monit. Remediat. 1988. V. 8. P. 93–97.
4. *Кутышенко В.П., Воробьев С.И.* // Биофизика. 2013. Т. 58. С. 573–581.
5. *Аскарьян Г.А., Прохоров А.М., Чантурия Г.Ф., Шипуло Г.П.* // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. С. 2180–2183.
6. *Simakin A.V., Astashev M.E., Baimler I.V. et al.* // J. Phys. Chem. B. 2019. V. 123. P. 1869–1880.
7. *Watanabe S., Brennen C.E.* // J. Fluids Eng. 2003. V. 125. P. 283–292.
8. *Gudkov S.V., Lyakhov G.A., Pustovoy V.I., Shcherbakov I.A.* // Phys. Wave Phenom. 2019. V. 27. P. 141–144.
9. *Lee J., Walker K., Han H. et al.* // PNAS. 2019. V. 116. P. 19294–19298.
10. *Ivanov V.E., Usacheva A.M., Chernikov A.V. et al.* // J. Photochem. Photobiol. B. 2017. V. 176. P. 36–43.
11. *Мещеряков Н.Ф.* Флотационные машины и аппараты. М.: Недра, 1982. 200 с.
12. *Bunkin N.F., Shkirin A.V., Penkov N.V. et al.* // Phys. Wave Phenom. 2019. V. 27. P. 102–112.

CONCENTRATION DEPENDENCES OF MOLECULAR OXYGEN AND HYDROGEN IN AQUEOUS SOLUTIONS

I. V. Baymler[1,2], S. V. Gudkov[1], R. M. Sarimov[1], A. V. Simakin[1], and Academician of the RAS I. A. Shcherbakov[1]

[1]*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation*

Received November 21, 2019

The effect of multiple dilutions on the concentration of substances is investigated. Shown that when a certain number of dilutions of an aqueous solution is reached, the concentration of impurities in the aqueous solution ceases to depend on the number of dilutions. The ability to observe this effect is determined by the sensitivity of the measurement method. It has been established that in aqueous solutions under conditions of mechanical action a change in their composition can occur, a change in the concentrations of molecules such as oxygen, as well as its active forms, is observed. The mechanisms of accumulation are different, for example, mixing stimulates the capture of molecular oxygen from the atmosphere. With turbulent mixing, the effect is more pronounced than with laminar. For the generation of hydrogen peroxide meets the mechanical analogue of the photohydraulic effect.

Keywords: aqueous solutions, molecular oxygen, molecular hydrogen, turbulent mixing