

## ГИДРООСМОТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ

Н. М. Бажин<sup>1,3,\*</sup>, академик РАН В. Н. Пармон<sup>2,3</sup>

Поступило 05.10.2017 г.

Для описания гидростатического давления, возникающего в ходе осмотического процесса при диффузии растворителя через мембрану, предлагается ввести термин “гидроосмотическое давление”. Использование этого термина позволяет избежать неопределённости, возникающей при применении термина “осмотическое давление”. Осмотическое давление характеризует концентрацию растворённых веществ в растворе вне зависимости от существования гидростатического давления. Гидроосмотическое давление представляет собой разность гидростатических давлений по обе стороны от мембраны. Термин “гидроосмотическое давление” позволяет наиболее корректно характеризовать суть многих процессов, происходящих при осмотических явлениях.

**Ключевые слова:** осмосис, осмотическое давление, мембрана, химический потенциал.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-5652484152-55>

Явление осмоса — самопроизвольного переноса растворителя через полупроницаемую мембрану, не пропускающую растворённое вещество и разделяющую два раствора различной концентрации или чистый растворитель и раствор — хорошо известно в физической химии с конца (и даже, по некоторым данным, с начала) XIX века и является классическим примером демонстрации справедливости законов классической химической термодинамики [1, 2]. Одним из наиболее ярких проявлений осмоса, широко используемого на практике в биологии, медицине, пищевой промышленности и т.д., является осмотическое давление. Под термином “осмотическое давление” по рекомендации ИЮПАК принято понимать избыточное давление, требуемое для поддержания осмотического равновесия между некоторым раствором и чистым растворителем, разделёнными мембраной, проницаемой только для растворителя [3].

Цель настоящей работы — показать, что для описания давления, возникающего в результате осмотического процесса, наиболее корректно было

бы использовать термин “гидроосмотическое давление” наряду с термином “осмотическое давление”.

Как уже сказано, осмотический процесс заключается в проникновении растворителя через пористую мембрану в раствор некоторых веществ, содержащихся, как правило, в этом же растворителе. Для простоты ниже мы будем рассматривать раствор, состоящий из растворителя (для определённости — воды) и только одного растворённого вещества. Простое устройство для наблюдения осмотического процесса изображено на рис. 1. Будем считать, что в левом отсеке (№ 1) находится чистая пресная вода, а в правом (№ 2) — раствор соли. Оба отсека с жидкостями разделены полупроницаемой мембраной, пропускающей в идеальном случае только воду. Если к правому отсеку присоединён поршень, в ходе осмотического процесса можно получить “осмотическую” работу, приложив к правому отсеку гидростатическое давление  $\Delta p$ .

Действительно, исходно система не находится в состоянии равновесия ввиду различия химических потенциалов воды в левой и правой частях устройства. Если, например, внешнее давление над водой в левом отсеке равно 1 бар, химический потенциал пресной воды ( $\mu_1$ ) будет равен химическому потенциалу чистой воды  $\mu^0$  в стандартном состоянии:

$$\mu_1 = \mu^0. \quad (1)$$

В предположении, что вода практически несжимаема, выражение для химического потенциала воды в правой части ( $\mu_2$ ) имеет вид

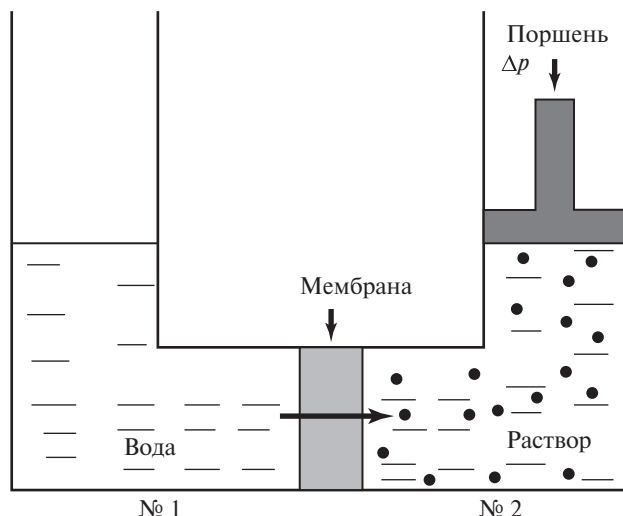
$$\mu_2 = \mu^0 + \Delta p \cdot \bar{V}_{\text{H}_2\text{O}} + RT \ln a_2, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск

<sup>2</sup> Институт катализа им. Г.К. Борескова  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск

<sup>3</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

\* E-mail: [bazhin8999@kinetics.nsc.ru](mailto:bazhin8999@kinetics.nsc.ru)



**Рис. 1.** Устройство для наблюдения осмотического процесса. Тёмные точки в правом отсеке системы изображают молекулы растворённого вещества (или ионы соли).

где  $\bar{V}_{\text{H}_2\text{O}}$  — мольный объём воды,  $\text{м}^3/\text{моль}$ , а  $a_2$  — активность воды в растворе

$$a_2 = \gamma_2 X_2, \quad (3)$$

Здесь  $X_2$  — мольная доля воды в растворе,  $\gamma_2$  — коэффициент активности воды в растворе.

Концентрация воды в растворе ниже концентрации воды в чистой воде, и поэтому  $a_2 < 1$ . При отсутствии создаваемого поршнем гидростатического давления ( $\Delta p = 0$ )  $\mu_2 < \mu_1$  и вода из левого отсека через мембрану будет поступать в правый отсек. Процесс перехода воды останавливается, если с помощью поршня к жидкости в правом столбце приложить давление ( $\Delta \tilde{p}$ ), при котором химические потенциалы воды в левом и правом отсеках устройства уравниваются:

$$\mu^0 = \mu^0 + \Delta \tilde{p} \cdot \bar{V}_{\text{H}_2\text{O}} + RT \ln a_2. \quad (4)$$

Отсюда получаем

$$\Delta \tilde{p} = -\frac{RT}{\bar{V}} \ln a_2. \quad (5)$$

Давление, определяемое выражением (5), называют осмотическим,  $\Delta \Pi$  (Па):

$$\Delta \Pi = \Delta \tilde{p} = -\frac{RT}{\bar{V}} \ln a_2. \quad (6)$$

В случае идеальных растворов с небольшой концентрацией растворённого вещества путём простых преобразований соотношения (6) можно получить хорошо известное выражение для осмотического давления

$$\Delta \Pi \approx C_S RT, \quad (6)$$

где  $C_S$  — концентрация растворённого вещества в растворе,  $\text{моль}/\text{м}^3$ . Таким образом, осмотическое давление представляет собой величину, которая зависит от концентрации растворённого вещества и температуры и которую обычно рассматривают как концентрацию растворённого вещества, выраженную в единицах давления. Так, например, поскольку концентрация ионов в морской воде равна примерно 1,2 М, считается, что осмотическое давление морской воды близко к 27 атм [4].

Очень существенно, что осмотическое давление не проявляется в виде реального давления, как, например, гидростатическое давление. Давление на дно в заполненном стакане с морской водой лишь незначительно отличается от давления в стакане, заполненном чистой водой (в силу различия в плотности жидкостей). Осмотическое давление нельзя представлять и как реальное давление растворённых ионов в морской воде; в этом случае купание в море стало бы невозможным.

Поэтому, как указано выше, осмотическим давлением обычно называют гидростатическое давление, возникающее в процессе осмоса. Например, клетки природных живых организмов, помещённые в чистую воду, набухают из-за реального гидростатического давления, возникающего в результате осмотического проникновения воды внутрь клеток. Поэтому с терминологической точки зрения для описания возникающего гидростатического давления, которое представляет собой разность давлений внутри клетки и во внешней среде, гораздо лучше подходит термин не осмотическое, а гидроосмотическое давление  $p_{\text{ho}}$  или  $\Delta p_{\text{ho}}$ , обозначающий гидростатическое давление, возникающее в результате осмотического процесса. Раствор внутри клетки теперь можно охарактеризовать двумя видами давлений: осмотическое — оно характеризует концентрацию растворённых молекул в клеточном растворе и гидроосмотическое давление ( $\Delta p_{\text{ho}}$ ), которое равно разности реальных давлений внутри клетки и в окружающей среде. Гидроосмотическое давление может меняться в широких пределах, вплоть до осмотического давления.

Таким образом, термин “осмотическое давление” разумнее всего употреблять для характеристики концентрации растворённых веществ в растворе.

Как уже указывалось, различие в концентрациях растворённых веществ в двух растворах, разделённых полупроницаемой мембраной, является причиной транспорта воды из раствора с меньшей концентрацией растворённых веществ (меньшим осмотическим давлением) в раствор с большей концентрацией (большим осмотическим давлением). Но это не означает, что движущей силой транспорта воды является осмотическое давление

в упомянутом смысле этого термина. Тем не менее в большинстве работ, посвящённых осмотическому давлению, используется идея об осмотическом давлении как о движущей силе [4–7]. Например, для системы, изображённой на рис. 1, поток воды ( $J_w$ ) слева направо через мембрану описывают выражением

$$J_w = A_w(\Delta\P - \Delta p), \quad (7)$$

где  $A_w > 0$  — проницаемость мембраны [5–8]. Поскольку для самопроизвольных (спонтанных) термодинамических процессов направление (знак) потока термодинамического параметра должно соответствовать знаку термодинамической движущей силы (см., например, [9–11]), формула (7) создаёт впечатление, что поток воды возникает в результате действия двух противоположно направленных сил: со стороны чистой воды — за счёт осмотического давления, со стороны раствора — за счёт приложенного гидростатического давления. Однако осмотическое давление чистой воды равно нулю. Осмотическое давление  $\Delta\P$  характеризует раствор, но поток воды направлен от чистой воды к раствору, т.е. в противоположном направлении. Поэтому осмотическое давление никак не может вызвать движение воды слева направо.

На самом деле выражение (7) является следствием описания диффузии воды из левого отсека с жидкостью в правый [12, 13]. При этом движущей силой такой диффузии является разность химических потенциалов воды по обе стороны мембраны. Как следует из выражений (2)–(5), в первом приближении эта разность действительно пропорциональна разности “осмотического” ( $\Delta\tilde{p} = \Delta\P$ ) и приложенного ( $\Delta p$ ) гидростатического давлений.

При сохранении различия в значениях  $\Delta p$  и  $\Delta\P$  движение воды слева направо будет приводить к увеличению высоты столба жидкости в правом отсеке. В результате в правой части будет расти гидроосмотическое давление и одновременно будет происходить разбавление раствора и уменьшение осмотического давления. Процесс перехода воды прекратится, когда гидроосмотическое давление сравняется с уменьшающимся осмотическим давлением.

Таким образом, термин “гидроосмотическое давление” позволяет наиболее корректно характеризовать суть многих процессов, происходящих при осмотических явлениях. Введение нового термина отнюдь не означает замену термина “осмотическое давление” на термин “гидроосмотическое давление”. Оба термина могут использоваться одновременно, описывая те или иные свойства системы.

**Источник финансирования.** Работа поддержана грантом РФФИ № 17–03–00252.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Atkins P., de Paula J.* Physical Chemistry. 9th ed. Oxford: Oxford Univ. Press, 2010. 972 p.
2. *Герасимов А. И., Древинг В. П., Еремин Е. Н., Киселев А. В., Лебедев В. П., Панченков Г. М., Шлыгин А. И.* Курс физической химии. М.: Химия, 1964. Т. 1. 624 с.
3. *Compendium of Chemical Terminology.* IUPAC Recommendations. 2nd ed. F. D. McNaught, A. Wilkinson. Eds. Oxford: Blackwell, 1999. 285 p.
4. *Ngai Yin Yip, Elimelech M.* Thermodynamic and Energy Efficiency. Analysis of Power Generation from Natural Salinity Gradients by Pressure Retarded Osmosis // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46. P. 5230–5239. DOI: org/10.1021/es300060m.
5. *Straub A. P., Deshmukh A., Elimelech M.* Pressure–Retarded Osmosis for Power Generation from Salinity Gradients: Is it Viable? // *Energy and Environ. Sci.* 2016. V. 9. P. 31–48. DOI: 10.1039/c5ee02985f.
6. *He W., Wang Y., Mujtaba I. M., Shaheed M. H.* An Evaluation of Membrane Properties and Process Characteristics of a Scaled-up Pressure Retarded Osmosis (PRO) Process // *Desalination.* 2016. V. 378. P. 1–13. DOI: org/10.1016/j.desal.2015.08.022.
7. *Achilli A., Childress A. E.* Pressure Retarded Osmosis: from the Vision of Sidney Loeb to the First Prototype Installatio. Review // *Desalination.* 2010. V. 261. P. 205–211. DOI: 10.1016/j.desal.2010.06.017
8. *Marbach S., Yoshida H., Bocquet L.* Osmotic and Diffusio-Osmotic Flow Generation at High Solute Concentration. Mechanical Approaches. // *J. Chem. Phys.* 2017. 146. 194701. DOI: org/10.1063/1.4982221.
9. *Пригожин И., Конденуди Д.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.
10. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
11. *Пармон В. Н.* Термодинамика неравновесных процессов для химиков. С приложением к химической кинетике, катализу, материаловедению и биологии. Долгопрудный: Интеллект, 2015. 472 с.
12. *Bazhin N. M.* Gibbs Energy Role in Fresh and Salt Water Mixing // *Desalination.* 2015. V. 365. P. 343–346. DOI: 10.1016/j.desal.2015.03.023.
13. *Bazhin N. M.* Water Flux in Pressure Retarded Osmosis // *Desalination.* 2015. V. 375. P. 21–23. DOI: 10.1016/j.desal.2015.07.027.

**HYDROOSMOTIC PRESSURE****N. M. Bazhin, Academician of the RAS V. N. Parmon**

Received October 5, 2017

This work proposes the term “hydroosmotic pressure” to define hydrostatic pressure emerging from an osmotic process during solvent diffusion through membranes. The usage of this term potentially clears the ambiguity of the term “osmotic pressure,” referring to the concentration of dissolved solids in a solution regardless of the existence of hydrostatic pressure. Hydroosmotic pressure is the difference between hydrostatic pressures on either side of the membrane; thus, the term “hydroosmotic pressure” allows for the most correct definition of many processes associated with osmotic phenomena.

*Keywords:* osmosis, osmotic pressure, membrane, chemical potential.