

УДК 372.854

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА АВОГАДРО
НА ФАКУЛЬТАТИВНЫХ ЗАНЯТИЯХ В ПРОФИЛЬНЫХ КЛАССАХ**

А.Е. Гелясин, Е.В. Гелясина

Витебск, Витебский областной институт развития образования

Сегодня понятия «атом» и «молекула» прочно вошли в содержание школьного естественнонаучного образования и, не верится, что еще сто лет назад в научных кругах бушевала дискуссия о реальности существования атомов. К концу XIX века в физике и химии утвердилась гипотеза об атомах и молекулах – мельчайших частицах, из которых составлены все тела окружающего нас мира. В хи-

ми атомная гипотеза позволила понять и очень удобно описывать химические реакции. В физике гипотеза об атомах и молекулах играла не менее важную роль и позволила физикам составить себе ясное представление о множестве самых различных явлений. Она помогла понять, что такое тепло и холод, почему тела при нагревании расширяются, почему всякое вещество может быть твердым, жидким и газообразным и многое другое. Чтобы все это понять, нужно было только дополнительно предположить, что атомы и молекулы непрерывно и беспорядочно движутся и что между ними действуют силы притяжения и отталкивания.

В 1814 году появляется статья А. Авогадро «Очерк об относительных массах молекул простых тел, или предполагаемых плотностях их газа, и о конституции некоторых из их соединений». В ней четко формулируется закон: «...равные объемы газообразных веществ, при одинаковых давлениях и температурах, отвечают равному числу молекул, так что плотности различных газов представляют собою меру масс молекул соответствующих газов». Другими словами, при нормальных условиях число молекул в моле любого вещества должно быть одинаково. Таким образом, это число есть универсальная постоянная, относящаяся к любому веществу, и оно получило название числа Авогадро (N_A). Это число – одна из важнейших универсальных постоянных современной физики и химии. Понятно, что одной из самых трудных проблем химии и физики второй половины XIX и начала XX веков было определение числа Авогадро. Сам Авогадро не делал оценок числа молекул в моле вещества, но понимал, что это очень большая величина.

Первую попытку определить значение числа Авогадро предпринял в 1865 году австрийский физик Й. Лошмидт. Он попытался впервые вычислить число N_A , исходя из кинетической теории газов. Можно доказать, что для моля газа соотношение между числом Авогадро и давлением, производимым определенной массой газа при данной температуре определяется формулой: $N_A = \frac{VP}{kT}$, где V – объем моля газа, P – давление газа, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Примерно таким соотношением (постоянная Больцмана еще не была введена в кинетическую теорию) и воспользовался Лошмидт при вычислении числа Авогадро. Им, в первом приближении, для числа Авогадро было получено значение 10^{22} .

Семь лет спустя эту константу более точно вычислил Й. Ван-дер-Ваальс. Он нашел, что число Авогадро должно быть равно $4,5 \cdot 10^{23}$. Однако, многие ученые продолжали считать атомы и молекулы не реально существующими частицами, а лишь рабочими гипотезами, придуманными ради удобства. При этом вряд ли кто-то из них осознавал, что за десятки лет до расчетов Лошмидта и Ван-дер-Ваальса получены экспериментальные результаты, позволяющие раз и навсегда решить вопрос в пользу существования атомов как физической реальности и достаточно точно определить число Авогадро. Правда, эти результаты были получены не физиком или химиком, а британским ботаником, морфологом и систематиком растений Р. Броуном (что еще раз подтверждает тезис о единстве природы и необходимости междисциплинарного подхода к изучению многих природных явлений).

В 1827 году Броун проводил исследования пыльцы растений. Разглядывая под микроскопом выделенные из клеток пыльцы растения, взвешенные в воде удлиненные цитоплазматические зерна, Броун заметил, что мельчайшие твердые

крупинки, которые едва можно было разглядеть в капле воды, непрерывно дрожат и передвигаются с места на место. Несмотря на кажущийся полный беспорядок, случайные перемещения броуновских частиц оказалось все же возможным описать математической зависимостью.

Впервые, строгое объяснение броуновского движения дали в 1905 году А. Эйнштейн (в то время еще мало кому известный эксперт в Патентном бюро швейцарского города Берна) и польский физик М. Смолуховский, который в те годы работал в Львовском университете. Статья Эйнштейна, опубликованная в мае 1905 г. в немецком журнале называлась «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты» [1]. Этим названием Эйнштейн хотел показать, что из молекулярно-кинетической теории строения материи с необходимостью вытекает существование случайного движения мельчайших твердых частиц в жидкостях. Эйнштейн рассмотрел броуновское движение при наличии вязкого сопротивления среды и, используя законы математической статистики и молекулярно-кинетической теории газов, вывел уравнение, описывающее зависимость среднеквадратичного смещения броуновской частицы, от макроскопических показателей среды. Им была получена формула: $\langle X^2 \rangle = \frac{kT}{6\pi\eta r} t$, где k – постоянная Больцмана, T – температура, η – динамическая вязкость жидкости, r – радиус частицы, t – полное время наблюдения за движением частицы.

К этому времени значение универсальной газовой постоянной R для моля уже было измерено, и оказалось равно произведению количества атомов в моле (числа Авогадро N_A) на постоянную Больцмана k ($R = k N_A$). Таким образом, определив смещение броуновской частицы за некоторый промежуток времени можно вычислить постоянную Больцмана и, следовательно, число Авогадро. Заканчивалась теоретическая статья Эйнштейна прямым призывом к экспериментаторам проверить его выводы на опыте: «Если бы какому-либо исследователю удалось вскоре ответить на поднятые здесь вопросы!» – таким необычным восклицанием заканчивает он свою статью [1].

В 1908 г. французский физик Ж. Перрен начал количественные наблюдения за движением броуновских частиц. Уравнение, полученное А. Эйнштейном, дало возможность Перрену экспериментально определить постоянную Больцмана k , а затем и постоянную Авогадро. Используя теоретическую формулу и результаты своих экспериментальных измерений Перрен получил достаточно точное, для того времени, значение числа Авогадро: $6,8 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. За свою работу Ж. Перрен в 1926 г. был удостоен Нобелевской премии по физике «за работу по дискретной природе материи и, в особенности за открытие седиментационного равновесия». Результаты, полученные Перреном, произвели сильное впечатление на всех ученых. Как написал через много лет американский физик А. Пайс, не перестаешь удивляться этому результату, полученному таким простым способом: достаточно приготовить взвесь шариков, размер которых велик по сравнению с размером простых молекул, взять секундомер и микроскоп, и можно определить постоянную Авогадро. После публикации результатов Перрена французский математик и физик А. Пуанкаре заключил: «Блестящее определение числа атомов Перреном завершило триумф атомизма. Атом химиков стал теперь реальностью».

Сегодня на факультативных занятиях учащиеся сами могут провести наблюдения и по их результатам определить число Авогадро. Препарат для исследования представляет собой воду, или другую жидкость с взвешенными броуновскими частицами размером в несколько микрон (например, слабый раствор туши, акварельной краски или молока в дистиллированной воде). Далее необходимо на предметное стекло нанести каплю эмульсии, накрыть покровным стеклом и настроить микроскоп. Микроскопы, входящие в состав школьного оборудования с увеличением до 800, в принципе, позволяют наблюдать движение броуновских частиц размером около 1 мкм.

Проводя такую работу, учителю необходимо сориентировать учеников на то, чтобы они добились отчетливой видимости нескольких подвижных частиц. При этом значимо соблюдение следующих методических рекомендаций, адресуемых учащимся:

1) убедитесь, что броуновские частицы двигаются лишь под воздействием молекул воды, а не взаимодействуют друг с другом (в противном случае следует уменьшить плотность раствора);

2) удостоверьтесь в хаотичности движения частиц, поскольку кроме хаотичного движения может наблюдаться их направленное движение, которое попытайтесь минимизировать.

Следует заметить, что проведение описываемых наблюдений требует достаточно длительной подготовки и кропотливой работы. Задачу можно упростить, если воспользоваться комплектом современного оборудования, в состав которого входят компьютер и микроскоп со встроенной цифровой камерой.

В движении броуновских частиц нет никакого порядка, они абсолютно случайны. Будем фиксировать местоположение частицы через ряд последовательных равных между собою промежутков времени Δt . Подчеркнем, что результат, который мы получим, не зависит от величины выбранного элементарного промежутка времени Δt . Итак, наблюдаем за частицей, находящейся в начальной точке. Включим секундомер и отмечаем промежуточные положения частицы соответствующие фиксированным моментам наблюдения (например, каждые 30 секунд). Обозначим смещения, происходящие за промежуток времени Δt через ΔR . Выключим секундомер, когда частица через время $t = n\Delta t$ (к примеру через 1500 секунд) окажется в точке окончания наблюдения. Таким образом, мы определили смещение частицы R , за полное время наблюдения t . Проведя несколько экспериментов можно вычислить среднее смещение частицы – $\langle R \rangle$ за один и тот же промежуток времени.

Как было сказано выше, А. Эйнштейн доказал, что квадрат смещения броуновской частицы, на выбранную ось связан со временем наблюдения следующим соотношением – $\langle X^2 \rangle = \frac{kT}{6\pi\eta r} t$. Используя взаимосвязи между физическими величинами, можно преобразовать указанное соотношение в более удобный

для наших вычислений вид: $N_A = \frac{2RT}{3\pi\eta r \langle R^2 \rangle} \cdot t$, где $R = 8,31$ Дж/моль·К – универсальная газовая постоянная, T – температура, при которой проводится эксперимент (по абсолютной термодинамической шкале), η – динамическая вязкость

жидкости (для воды при 20°C $\eta = 10^{-3}$ Па·с), r – радиус частицы, t – полное время наблюдения за движением частицы, $\langle K^2 \rangle$ – средний квадрат смещения частицы за полное время наблюдения. Итак, определив средний квадрат смещения частицы за полное время наблюдения и подставив его в полученную нами формулу можно вычислить постоянную Авогадро (и постоянную Больцмана). Следует заметить, что использование макроскопического приближения для описания молекулярных характеристик движения даёт лишь оценочные результаты. Поэтому, если в ученическом эксперименте удастся определить порядок числа Авогадро – 10^{23} , это будет достаточно хорошим результатом. Следует заметить, что сегодня можно проводить высококачественные и достаточно точные исследования. Например, с использованием цифрового микроскопа LEVENHUKD320L с объективами 4x, 10x, 40x, 100x и камеры для него, подключающейся к компьютеру нам удалось организовать ученическое исследование на факультативных занятиях, в ходе которых с помощью достаточно простой методики были получены численные значения постоянной Больцмана и числа Авогадро ($N_A = 6,34 \cdot 10^{23}$ и $k = 1,31 \cdot 10^{-23}$), достаточно близкие к общепринятым табличным ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ и $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$). В наше время за единицу количества вещества условились принять такое его количество, в котором содержится столько частиц (атомов, молекул), сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода с атомной массой 12, то есть $N_A = (6,022045 \pm 0,000031) \cdot 10^{23}$ частиц (число Авогадро N_A).

Таким образом, даже в условиях школьного физико-химического эксперимента оказывается возможным наблюдение за движением броуновских частиц, получение экспериментальных подтверждений положений молекулярно-кинетической теории вещества и определение довольно точного значения числа Авогадро.

Список литературы

1. *Эйнштейн, А.* О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты /А. Эйнштейн. – Собр. науч. трудов в 4-х т. /Ред. кол. ак. И.Г. Петровский и др. – Т.3. – Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики 1901 – 1955. – М.: Наука, 1966. – С. 108-127.
2. *Гелясин, А.Е.* Как подсчитать количество невидимого /А.Е. Гелясин, Е.В. Гелясина // *Хімія: проблеми викладання.* – 2012. – №3. – С. 34-40.