УДК 533.15

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАПАХА В ВОЗДУХЕ. ЧАСТЬ 1

Монастырский Л.М., Бондарев Р.В.
ГОУ ВПО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону,
e-mail: physdekan@sfedu.ru

В работе сделана попытка избавиться от широко распространенного заблуждения среди преподавателей физики относительно механизма распространения запаха в воздухе. В первой части статьи теоретически показано, что диффузия не может объяснить это физическое явление. Альтернативным механизмом, описывающий этот процесс, может быть концентрационная конвекция.

Ключевые слова: диффузия, конвекция, средняя длина свободного пробега, броуновское движение

TO THE QUESTION OF THE MECHANISM OF DISTRIBUTION OF THE SMELL IN AIR. PART 1

Monastyrckiy L.M., Bondarev R.V.
Southern Federal University, Rostov-on-Don,
e-mail: physdekan@sfedu.ru

In this work is made attempt to get rid of widespread delusion among teachers of physics concerning the mechanism of distribution of a smell in air. In the first part of article it is theoretically shown that diffusion cannot explain this physical phenomenon. The alternative mechanism, the describing this process, can be concentration convection.

Keywords: diffusion, convection, average length of free run, Brownian motion

На вопрос о механизме распространения запаха практически любQой преподаватель учебного заведения (да и не только) ответит, что, конечно, это же диффузия. Однако ответ на этот вопрос не является таким очевидным.

Прежде всего, следует сослаться на публикацию в приложении к журналу «Квант» [1]. Там при решении задачи о механизме распространении запах в воздухе говорится о распространении запаха за счет конвекции, но в качестве альтернативы рассмотрено и влияние диффузии на этот процесс.

Попытаемся более подробно разобраться в этом вопросе. Первое, что надо сделать, это построить модель процесса распространения запаха. Начнем с диффузии в газах. ДИФФУЗИЯ (от лат. diffusio – распространение – растекание, рассеивание), движение частиц среды, приводящее к переносу вещества и выравниванию концентраций или к установлению равновесного распределения концентраций частиц данного сорта в среде.

В 1920 году Штерн ставит опыты по определению скоростей теплового движения молекул в опытах с молекулярными пучками. Эти опыты дали для наивероятнейшей скорости молекул серебра значения около 500 м/с. Совершенно ясно, что молекулы в газе не перемещаются поступательно именно с такой скоростью. Внутри вещества находится колоссальное количество молекул. Из основного уравнения МКТ

$$P = nkT$$

следует, что концентрация молекул газа равна

$$n = \frac{P}{kT}.$$

Рассчитаем концентрацию при нормальном атмосферном давлении и температуре 273 К.

$$n = \frac{10^5 \text{ Па}}{1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}} = 7{,}2 \cdot 10^{27} \ 1/\text{м}^3.$$

Нам невозможно представить себе такое число. Это невообразимо огромная величина, в земных условиях нет такого количества счетных величин. Расстояние, на которое перемещается молекула между двумя последовательными столкновениями, называется ее длиной свободного пробега. В силу хаотичности движения прямолинейные участки траектории, по которой движется молекула, могут сильно различаться по своей длине. Поэтому говорят о средней длине свободного пробега. Длина свободно-

го пробега обратно пропорциональна квадратному корню из концентрации молекул.

$$\lambda \sim \frac{1}{\sqrt{n}} = 1,4 \cdot 10^{-14} \text{ м}.$$

В воздухе школьного класса при нормальной плотности в течение 1 с молекула испытывает около 1 млрд. столкновений. При этом она постоянно меняет направление своего движения. Как же рассчитать теоретически время поступательного перемещения молекулы в одном направлении?

В какой-то мере диффузию можно уподобить броуновскому движению. Конечно, размер атомов гораздо меньше размера броуновских частиц, но нам кажется, что это не является принципиальным препятствием к проведению некоторых численных оценок.

Броуновское движение молекул подтверждает хаотический характер теплового движения и зависимость интенсивности этого движения от температуры. Впервые беспорядочное движение мелких твердых частиц, наблюдал английский ботаник Р. Броун в 1827 году, рассматривая взвешенные в воде твердые частички – споры плауна. С тех пор, движение частиц в жидкости или газе называется броуновским.

Теория броуновского движения в реальной жизни

Теория случайных блужданий имеет важное практическое приложение. Говорят, что в отсутствие ориентиров (солнце, звезды, шум шоссе или железной дороги и т.п.) человек бродит в лесу, по полю в буране или в густом тумане кругами, все время возвращаясь на прежнее место. На самом деле он ходит не кругами, а примерно так, как движутся молекулы или броуновские частицы. На прежнее место он вернуться может, но только случайно. А вот свой путь он пересекает много раз. Рассказывают также, что замерзших в пургу людей находили «в каком-нибудь километре» от ближайшего жилья или дороги, однако на самом деле у человека не было никаких шансов пройти этот километр, и вот почему.

Чтобы рассчитать, насколько сместится человек в результате случайных блужданий, надо знать величину λ, т.е. расстояние, которое человек может пройти по прямой, не имея никаких ориентиров. Эту величину с помощью студентов-добровольцев измерил доктор геолого-минералогических наук Б.С. Горобец. Он, конечно, не оставлял их в дремучем лесу или на заснеженном поле, все было проще – студента ставили в центре пустого стадиона, завязывали ему глаза и просили в полной тишине (чтобы исключить ориентирование по звукам) пройти до конца футбольного поля. Оказалось, что в среднем студент проходил по прямой всего лишь около 20 метров (отклонение от идеальной прямой не превышало 5°), а потом начинал все более отклоняться от первоначального направления. В конце концов, он останавливался, далеко не дойдя до края.

Пусть теперь человек идет (вернее, блуждает) в лесу со скоростью 2 километра в час (для дороги это очень медленно, но для густого леса – очень быстро), тогда если величина λ равна 20 метрам, то за час он пройдет 2 км, но сместится всего лишь на 200 м, за два часа – примерно на 280 м, за три часа – 350 м, за 4 часа – 400 м и т. д. Двигаясь по прямой с такой же скоростью, человек за 4 часа прошел бы 8 километров.

Далее следует вспомнить работы А. Эйнштейна и М. Смолуховского [2]. Именно они для броуновского движения получили выражение для среднеквадратичного смещения частицы вдоль произвольного направления:

$$R = \sqrt{2Dt},$$

здесь D – коэффициент диффузии, t – время движения частицы. Зная коэффициент диффузии в газах D, и, задавая расстояние R, можно оценить время прохождения частицей этого расстояния.

Если для коэффициента диффузии паров спирта в воздухе взять величину $D=10^{-5}$ м^2/с, для расстояния R=1 м, то получим время $t \sim 5 \cdot 10^4$ с = 13,9 ч. Это достаточно красноречивый результат.

С другой стороны, нельзя ли рассматривать распространение запаха в условиях нарушения равновесности состояния среды (например, при наличии градиента концентрации)? Ведь согласно уравнения состояния идеального газа (1), и при наличии градиента концентрации в изотермической среде появляется градиент давления, который может привести к появлению конвекционных гидродинамических потоков внутри отдельных областей газа. В этом случае уже приходится говорить о конвекции, как основном механизме распространения запаха. Например, в условиях тепловой конвекции видно, что дым от сигарет достаточно быстро распространяется во все стороны, а не только вверх, под действием силы Архимеда, или вниз под действием силы тяже-

сти. Правда, в этом случае речь идет о тепловой конвекции.

Перенос вещества, обусловленный одновременно молекулярной диффузией и макроскопическим движением среды (конвекцией), называется конвективной диффузией.

Конвективная диффузия может быть вызвана как действием на систему разности давлений, так и гравитационным полем. Если идет речь о сигаретном дыме, то мы имеем дело с конвективной диффузией, вызванной действием силы тяжести. В нашем случае при распространении запаха мы, вероятнее всего, имеем дело с конвективной диффузией, вызванной разностью давлений в различных частях среды. Механизм этого процесса достаточно сложен и выходит за рамки школьного курса физики.

Во второй части нашей статьи мы рассмотрим эксперимент, который был поставлен для выяснения роли конвективной диффузии в распространении запаха.

Список литературы

1. Слободецкий И.Ш., Асламазов Л.Г. Задачи по физике // Библиотечка «Квант», № 5, 1980.

2. Эйнштейн А., Смолуховский М. Броуновское движение. – М. – Л., 1936.