

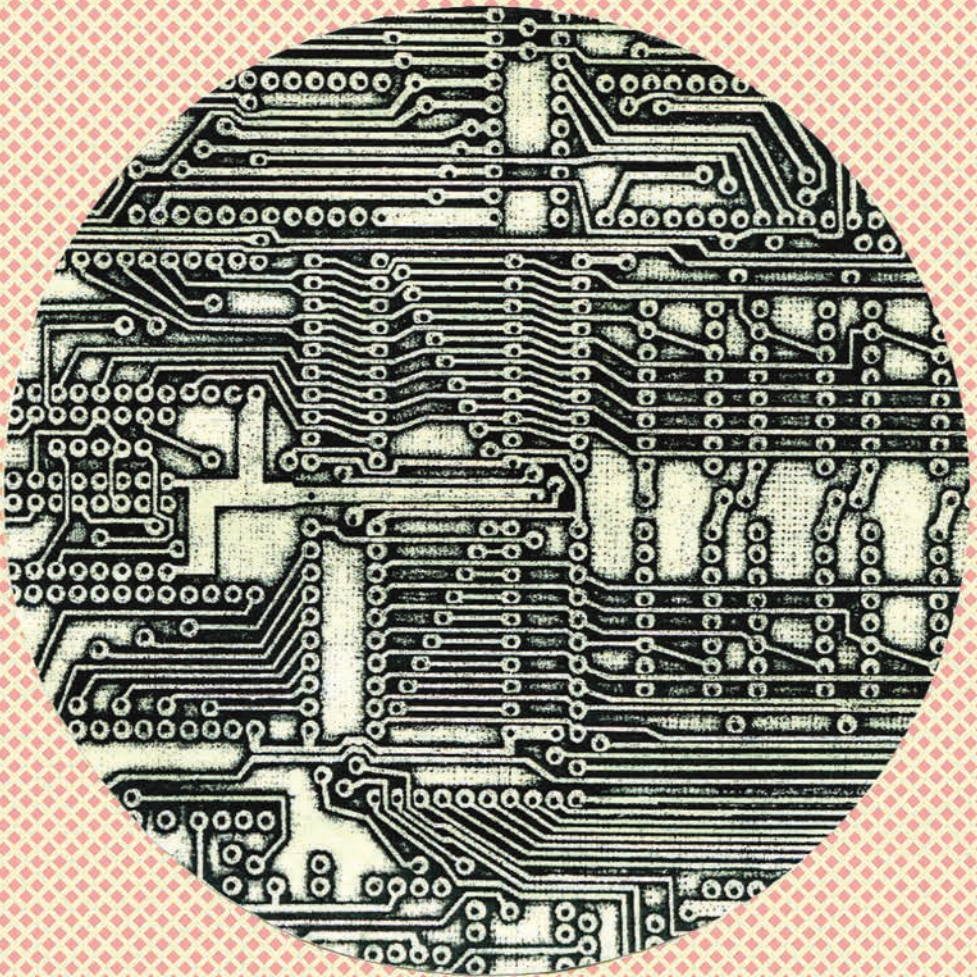
МАРТ

ISSN 0130-2221

2017 · № 3

КВАНТ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



В номере:

УЧРЕДИТЕЛИ

Российская академия наук
Математический институт
им. В.А.Стеклова РАН
Физический институт
им. П.Н.Лебедева РАН

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А.Л.Семенов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Н.Андреев, А.Я.Белов,
Ю.М.Брук, А.А.Варламов, С.Д.Варламов,
А.Н.Виленкин, В.И.Голубев,
Н.П.Долбилин, С.А.Дориченко,
В.Н.Дубровский,
А.А.Егоров, А.А.Заславский,
П.А.Кожевников (*заместитель главного редактора*),
С.П.Конвалов, А.А.Леонович,
Ю.П.Лысов, В.В.Произволов, В.Ю.Протасов,
А.М.Райгородский, Н.Х.Розов, А.Б.Сосинский,
А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин, В.М.Тихомиров,
В.А.Тихомирова, А.И.Черноуцан (*заместитель главного редактора*)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

А.В.Анджанс, М.И.Башмаков, В.И.Берник,
В.Г.Болтянский, А.А.Боровой,
Н.Н.Константинов, Г.Л.Коткин, С.П.Новиков,
Л.Д.Фаддеев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
1970 ГОДА

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

И.К.Кикоин

ПЕРВЫЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬ
ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

А.Н.Колмогоров

Л.А.Арцимович, М.И.Башмаков,
В.Г.Болтянский, И.Н.Бронштейн, Н.Б.Васильев,
И.Ф.Гинзбург, В.Г.Зубов, П.Л.Капица,
В.А.Кириллин, Г.И.Косоуров, В.А.Лешковцев,
В.П.Лишевский,
А.И. Маркушевич, М.Д.Миллионщиков,
Н.А.Патрикеева, Н.Х.Розов, А.П.Савин,
И.Ш.Слободецкий, М.Л.Смолянский,
Я.А.Сморodinский, В.А.Фабрикант,
Я.Е.Шнайдер

- 2 Массоперенос. *Л.Ашкинази*
10 Блуждания по цепям. *А.Гиль, А.Петрунин*

ЗАДАЧНИК «КВАНТА»

- 17 Задачи M2454–M2457, Ф2461–Ф2464
18 Решения задач M2441–M2445, Ф2448–Ф2452

НАШИ НАБЛЮДЕНИЯ

- 25 Июльский град. *Ю.Носов*

«КВАНТ» ДЛЯ МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ

- 26 Задачи
27 Почему гравитационная энергия отрицательна.
С.Дворянинов

КОНКУРС ИМЕНИ А. П. САВИНА

- 29 Задачи 20–23

ШКОЛА В «КВАНТЕ»

- 30 Полет в кристаллическом облаке. *А.Кашеваров, А.Стасенко*

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ

- 32 Молекулярно-кинетическая теория и
характеристики вещества. *С.Варламов*

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КРУЖОК

- 39 Переключения рядов. *Е.Бакаев*

ПРАКТИКУМ АБИТУРИЕНТА

- 46 Шунты и добавочные сопротивления в задачах.
Б.Мукушев

ОЛИМПИАДЫ

- 50 Региональный этап XLIII Всероссийской
олимпиады школьников по математике
52 Региональный этап LI Всероссийской
олимпиады школьников по физике
58 Ответы, указания, решения

НА ОБЛОЖКЕ

- I *Иллюстрация к статье «Массоперенос»*
II *Коллекция головоломок*
III *Шахматная страничка*
IV *Прогулки с физикой*

Массоперенос

Л. АШКИНАЗИ

Какой он бывает вообще

Массоперенос (некоторые его примеры проиллюстрированы на приведенных в статье рисунках) – это не только съезжание тела с наклонной плоскости и качание маятника, не только полет Земли вокруг Солнца и Солнца вокруг центра Галактики и даже не только электрический ток в электролите и электролите. Ведь и свет отклоняется Солнцем, и электромагнитное излучение давит на крылышки в приборе Лебедева и на «солнечный парус». Все эти виды массопереноса осуществляются отдельными макроскопическими телами, элементарными частицами, квантами. Его анализируют, применяя законы механики и пользуясь для квантов понятием импульса фотона. Если же массоперенос осуществляется непрерывной средой, газом или жидкостью, его анализируют, используя другой язык – понятия давления, плотности, вязкости, конвекции и т.д., а также уравнения газо- и гидродинамики. Разумеется, в газе и жидкости есть

отдельные частички, но даже те из вас, кто знает, что воздух состоит из молекул, говорят о температуре, скорости ветра, давлении и влажности. Вообще же, переход от описания частиц к описанию ансамбля – вопрос непростой и интересный.

Так вот, для массопереноса в жидкости и газе из параметров вещества первостепенное значение имеет вязкость – именно она определяет, какие нужны силы, т.е. перепады давлений, чтобы вызвать те или иные движения газа или жидкости. Тут ситуация проста: среди газов самый вязкий (при атмосферном давлении и температуре 20 °C) это неон Ne, его вязкость равна $3,1 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), вязкость жидкости сверху ничем не ограничена – стекло в окне тоже ведь жидкость. Самая малая вязкость среди газов – у водорода H_2 ($0,88 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с)), среди нормальных жидкостей – у диэтилового эфира $(C_2H_5)_2O$ ($0,22 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с)) и пентана C_5H_{12} ($0,23 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с)), а среди «жидкостей вообще» – у сверхтекучего гелия 4He .

При испарении плотность уменьшается на три порядка, значит, вещество должно сильно расширяться, значит – переместиться. Например, кубический сантиметр воды, испарившись при атмосферном давлении, займет почти кубический дециметр – это ли не перемещение. Поэтому причислим испарение к процессам массопереноса и спросим, у каких веществ наименьшая и наибольшая скорости испарения. Так вот, наибольшая



– у гелия He, точнее у его изотопа ^3He , а у изотопа ^4He она меньше. Они кипят при атмосферном давлении при температуре 3,2 К и 4,2 К соответственно. Или можно сказать так – слой толщиной в один атом (монослой) ^4He испаряется за секунду при 0,4 К, а монослой ^3He – при 0,2 К.

Медленнее всего из элементов испаряются тантал Ta, вольфрам W и рений Re, они кипят при температуре примерно 5460 °С, 5560 °С и 5600 °С, а монослой за секунду испаряется с них, соответственно, при 2600 °С, 2700 °С и 2750 °С. Однако нет ли среди тугоплавких соединений (упомянутых выше карбидов) достойных им конкурентов? Подозрение законное: в общем, чем выше температура плавления, тем меньше при одной и той же температуре скорость испарения. Это правило не соблюдается жестко: например, олово Sn и галлий Ga имеют меньшую, чем «положено», скорость испарения, а цинк Zn и кадмий Cd – большую, но проверить не мешает. К сожалению, данные в этой области температур вообще не слишком надежны, но скорее всего HfC и TaC кипят при 5400 °С и 5500 °С, т.е. почти не уступают своим металлическим конкурентам. Правда, последние могут им бросить упрек – мы-де испаряемся добросовестно, а вы при этом разлагаетесь.

Еще и ионная бомбардировка

Для массопереноса, при котором вещество отделяется от твердого или жидкого материала, должны разрываться межатомные связи. Значит, для этого у атомов должна быть энергия. Естественно, она у них есть, причем средняя энергия растет линейно с увеличением температуры. При этом растет и доля атомов (или молекул), которые имеют энергию, достаточную для разрыва связей, т.е. для испарения. Но



сообщить энергию атомам можно и без нагрева – например, обрушив на поверхность поток частиц: атомов, ионов, элементарных частиц. И это весьма важная проблема для современной техники, потому что во многих устройствах поверхности работают именно в таких условиях и при этом не должны разрушаться. Соответствующие ситуации бывают трех типов.

Первая ситуация характерна для электронных вакуумных приборов, например ламп бегущей волны (спутниковая связь), клистронов (телевидение, радиолокация) и магнетронов (радиолокация, СВЧ-печи). В этих случаях работоспособность прибора связана с работой выхода катода, создающего поток электронов в приборе. А работа выхода сильно зависит от состава поверхности катода, причем влияние на уровне десятых долей монослоя выводит катод и прибор из строя. С материалом катода здесь сделать почти никогда ничего нельзя – можно лишь попытаться сделать менее вредным поток ионов. Для этого надо либо уменьшить концентрацию газов в приборе (особенно газов с большими атомными массами, они вреднее), либо уменьшить энергию бомбардирующих катод ионов, либо попытаться отвести поток ионов от катода.

Вторая ситуация – когда мы можем выбирать материал и структуру части прибора, разрушаемой ионами или иными

частицами, причем нам важно только, чтобы материал не разрушался. Дать здесь какие-либо общие рекомендации трудно – уж очень разнообразны условия работы. Ориентировочно можно считать, что к разрушению потоками ионов более устойчивы следующие элементы: С, В, Ве, Al, Ti, V, Zr, Nb, Ta, Mo, W, Fe, а также их сплавы и соединения.

Третья ситуация – когда мы можем выбирать материал и структуру части прибора, разрушаемой ионами или иными частицами, причем нам важно, и чтобы материал не разрушался, и какие именно продукты его разрушения попадают в прибор. Это ситуация Токамака – реактора для получения управляемого термоядерного синтеза, причем там эта проблема столь важна, что она получила имя собственное: «Проблема первой стенки». Дело в том, что для его работы очень вредны примеси тяжелых ионов в плазме. Это немедленно сокращает список подходящих элементов до С, В, Ве, Al, Ti, V, их сплавов и соединений. После множества исследований для строящегося во Франции по международному проекту Токамака выбран бериллий. Эта история настолько важна и интересна, что о ней стоит рассказать немного подробнее.

Требования, предъявленные к материалу первой стенки Токамака, открыли новую страницу в материаловедении. Записи на этой странице лишь начаты. Поэтому пока ограничимся перечнем основных процессов, происходящих при таких воздействиях. Во-первых, распыление потоками ионов. Во-вторых, распыление под действием потоков нейтронов. В-третьих, при нейтронной бомбардировке из поверхности стенки вылетают «куски» примерно по 10 мкм^3 – так называемые «чанги». В-четвертых, вколоченные в материал атомы гелия и водорода собираются в пузыри, и в результате материал «распухает» – такой процесс называется «свеллинг». Если пузырь образуется близко к поверхности, она вспучивается – такой процесс называется «блистеринг». В-пятых, шелушение поверхности – верхняя корка на этом пузыре отваливается, этот процесс назы-

вается «флекинг». Получающаяся в результате блистеринга пористая, губчатая поверхность тормозит флекинг, и после разрушения материала на некоторую глубину процесс замедляется. Предложено и целенаправленное применение этого эффекта – использование поверхности с губчатой, игольчатой (щетка) и сотовой структурой. В последнем случае замедляется и распыление, так как часть материала переплывается со стенки на стенку, не вылетая в объем. И, наконец, в-шестых, радиационная сегрегация – под действием облучения ионами меняется состав сплавов, т. е. облучение вызывает диффузию. Ни про один из этих процессов нельзя сказать, что он достаточно изучен и понят. Рассмотрим наиболее изученный из них – ионное распыление.

Коэффициент распыления, т.е. отношение количества распыленных атомов к числу попавших на поверхность ионов, увеличивается с увеличением массы иона и с уменьшением энергии испарения (энергии, необходимой для испарения атома) материала мишени. С увеличением энергии падающих ионов до величин порядка 10 кэВ коэффициент распыления сначала растет, потом начинает убывать. Однако строгой теории катодного распыления, которая могла бы надежно предсказать экспериментальные данные до их получения, нет. Впрочем, для физики поверхности эта ситуация не нова.

Многочисленные существующие теории катодного распыления можно разбить на две группы: тепловые и механические. Тепловые объясняют распыление нагретом поверхности в месте удара иона и испарением; механические – столкновением иона с атомами мишени, в результате которого атомы мишени (соударяясь и друг с другом) получают импульс, направленный к поверхности мишени, и вылетают в вакуум. Механические теории отличаются одна от другой гипотезами о конкретном механизме взаимодействия иона с атомами и дают разные результаты, согласующиеся с теми или иными экспериментальными данными. Понятно, почему при больших энергиях коэффи-

коэффициент распыления невелик: падающий ион слишком глубоко забирается в глубь материала и выбитые им со своих мест атомы не добираются до поверхности. Понятно, почему коэффициент распыления мал при малых энергиях. Но гораздо большее количество фактов непонятно или понятно не совсем.

Например, при ионной бомбардировке на поверхности может появиться рельеф, причем довольно сложный. А возможна и полировка, сглаживание поверхности при бомбардировке ионами малых энергий. Это связано, видимо, с тем, что атомы, находящиеся на выступах, имеют меньшую энергию связи (их нужно оторвать от меньшего количества атомов) и поэтому можно так выбрать энергию ионов, что эти атомы будут распыляться сильно, а остальные – слабо. При высокой плотности потока ионов, бомбардирующих электрод, концентрация внедренных в него атомов и возникших в нем дефектов решетки достигает таких значений, что кристаллическая решетка полностью разрушается и материал переходит в аморфное состояние. При этом исчезает четко выраженная температура плавления, и эта непонятная смесь металла и газа начинает ползти, оплывать (как свеча) под действием силы тяжести.

Но то, что происходит при катодном распылении многокомпонентных соединений, устроено еще сложнее. Можно еще догадаться, почему примесь одного металла к другому иногда вызывает образование рельефа при распылении: слабо распыляющаяся примесь, если ее атомы сосредоточены на каких-то участках, защищает от распыления находящийся под ней материал. Но почему добавка нескольких процентов висмута к меди увеличивает коэффициент распыления наполовину или почему добавление нескольких процентов алюминия к золоту снижает распыление в десять раз – неизвестно. Для распыления сплавов существует несколько теорий, иногда то одна, то другая способна правильно предсказать результаты отдельных экспериментов.

Массоперенос при протекании тока

Самое очевидное – это массоперенос при электролизе расплава. Он тем больше, чем больше масса ионов и меньше их заряд, и тем меньше, чем ионы легче, а заряд больше. В первом случае наше внимание привлекает CsI, он плавится примерно при 630 °С, во втором – BN, он плавится при 3000 °С. При этих температурах они уже прилично проводят ток, но вообще-то для массопереноса при ионной проводимости расплав не обязателен. В твердой фазе массоперенос происходит тоже будет – числу Фарадея безразлично, о каком состоянии идет речь. А если говорить не о расплавах, а о растворах, то массоперенос будет только больше за счет сольватации (электростатического взаимодействия между частицами растворенного вещества и растворителя) – каждый ион будет волочить за собой оболочку из молекул растворителя. Правда, у BN плохо с растворимостью, так что придется ограничиться LiF.

Теперь посмотрим на электронные проводники. При самом обычном токе в проводе переносится не только заряд, но и масса, хотя отношение массы к заряду – это отношение массы электрона к его заряду, т.е. примерно $5,7 \cdot 10^{-12}$ кг/Кл. Ровно то же происходит при протекании электронного тока в вакууме, а при протекании ионного тока в вакууме перенос массы будет того же порядка, что и в электролите.

Сложнее ситуация в плазме, где текут одновременно и электронный ток, и ионный. Если длины свободного пробега и энергии ионов и электронов примерно равны, то (попробуйте показать это расчетом) добавка к тепловой скорости, которую приобретают частицы под действием электрического поля, обратно пропорциональна корню из массы, а «поток массы», соответственно, просто пропорционален корню из массы. Ток в такой плазме – это преимущественно ток электронный, но массу переносят в основном ионы. В неравновесной плазме, когда энергия электронов может превосходить энергию ионов, например на два порядка, тепловые скорости электронов оказываются больше, вре-

мя между соударениями и влияние на их скорость внешнего поля, соответственно, меньше, превосходство электронного тока над ионным уменьшается, и их роль в переносе массы может быть и сравнимой.

Но в обычных металлах тоже есть свои хитрости. Электроны, разогнанные полем, тормозятся ионами и отдают им не только энергию, нагревая проводник, но также и часть импульса. Это приводит к явлению, называемому электропереносом. Эффект растет с увеличением плотности тока, а большую плотность тока человек использует в микросхемах – токи там небольшие, но проводники с каждым годом делаются все тоньше. Электроперенос приводит к возникновению дефектов в проводящих дорожках и может вызвать выход микросхемы из строя. В промышленности электроперенос применяется для очистки жидких металлов от примесей: поскольку ионы основного металла и примеси взаимодействуют с электронами по-разному, то ионы примеси будут перемещаться, но к аноду или катоду – зависит от многих причин. Кроме того, эффект может применяться для разделения изотопов – ионы более легкого изотопа сильнее увлекаются электронами и поэтому перемещаются к аноду.

Диффузия и не только

Что такое диффузия, мы вроде бы знаем из учебника, но знаем плохо. Диффузию часто путают с другими механизмами перемещения вещества. Из книги в книгу повторяется одна и та же ошибка – объяснение диффузией распространения запаха духов в комнате. Между тем, характерная длина диффузии в газе за 10 секунд – около 3 миллиметров. Из книги в книгу приводятся примеры диффузии в жидкостях, но не говорится, что и конвекция, и вызванные другими причинами движения газа и жидкости запросто маскируют диффузию. В жидкости характерное расстояние диффузии за 20 минут – около 1 миллиметра. А тут стакан становится синим за минуту.

С диффузией в твердых телах тоже не все хорошо. Например, обычно приводит-

ся пример с прижатием двух брусков – из свинца Pb и золота Au. Возможно, что по традиции, поскольку именно на этой паре металлов была впервые (в 1896 году) обнаружена диффузия. Одно из необходимых условий – высокий коэффициент диффузии, и в данном случае это условие выполнено, но есть еще одно условие. Какое? Подумайте, а пока вернемся к газам и жидкостям.

Диффузию характеризуют коэффициентом диффузии. Сначала дадим точное определение, а потом объясним «на пальцах», что это значит. Коэффициент диффузии D связывает поток вещества N и градиент концентрации, т.е. величину, показывающую, как с координатой x меняется концентрация C , а именно:

$$N = D \frac{\Delta C}{\Delta x}.$$
 Посмотрим на размерности:

$[N] = \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), [C] = \text{кг}/\text{м}^3, [x] = \text{м},$

следовательно, $[D] = \text{м}^2/\text{с}$. Для газов коэффициент диффузии тем больше, чем легче и меньше атом (или молекула), поэтому на одном конце шкалы располагаются He ($D = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$) и H₂ ($1,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$), а на другом – например, Xe ($0,048 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$) и UF₆ ($0,016 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$). Эти величины характеризуют поток атомов однородного газа; казалось бы, о каком градиенте здесь может идти речь – газ однороден, $\Delta C = 0$, каким ни выбирай Δx . Но ведь атомы-то продолжают двигаться, просто мы этого не замечаем, поскольку они одинаковы. Вот если сделать их разными, используя изотопы, то мы сможем оценить, как диффундирует вещество само в себе; соответствующее D называется коэффициентом самодиффузии. Если же у нас имеется смесь двух газов, то мы можем измерять концентрации газов по отдельности, и окажется, что D зависит от обоих газов. Например, в смеси Kr + H₂ он равен $0,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, а в смеси Kr + Xe – $0,08 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Интуитивно понятно, что коэффициент диффузии в жидкостях может быть очень мал – т.е. так же мал, как в твердых телах,