

ГЛАВА 1

ПОПКОРН И РАКЕТЫ

Законы поведения газов

Взрывы на кухне, конечно же, плохая идея. Но в исключительных случаях малюсенький взрывчик способен привести нас в восторг. Сердцевина высушенной кукурузы содержит массу полезных питательных компонентов — углеводов, белков, железа и калия, — но все они чрезвычайно плотно упакованы и скрываются под очень прочной оболочкой. Поэтому, чтобы сделать их пригодными для употребления в пищу, требуется соответствующая переработка. Подходящим вариантом в данном случае мог бы послужить взрыв, и, к счастью для нас, кукурузные зерна содержат в себе все необходимое для собственного разрушения. Прошлым вечером я занималась чем-то наподобие баллистического приготовления еды — делала попкорн. Каждый раз испытываешь чувство невероятного облегчения, когда узнаешь, что под жесткой и непривлекательной наружностью скрывается мягкое и приятное содержимое, — но почему разрушение такой оболочки приводит к образованию пенистой структуры, а не мелких частиц?

Когда масло в кастрюле нагрелось, я насыпала в нее столовую ложку кукурузных зерен, накрыла кастрюлю крышкой и оставила на огне, а сама стала заваривать чай. На улице шел сильный дождь, сопровождавшийся

порывами ветра, и дождевые капли громко барабанили по оконному стеклу. Зерна прогревались в масле, которое тихо шипело. Мне казалось, что ничего особенного не происходит, но внутри кастрюли представление уже началось. В каждом ядре кукурузы есть зародыш, который дает начало новому растению, и эндосперм, служащий для него питанием. Эндосперм состоит из крахмала, упакованного в гранулы, и содержит примерно 14% воды. Когда кукурузные зерна попадают в горячее масло, вода начинает испаряться, образуя пар. Горячие молекулы перемещаются быстрее, и по мере прогревания каждого ядра появляется все больше молекул воды, пребывающих в состоянии пара. Эволюционное предназначение оболочки кукурузного зерна — защита содержимого сердцевинки от внешних неблагоприятных воздействий (например, механических повреждений), но, находясь в кипящем масле, она представляет собой нечто наподобие котла с плотно завинченной крышкой, внутри которого разворачивается процесс, все интенсивнее воздействующий на крышку изнутри. Молекулам воды, превратившейся в пар, некуда деваться, давление внутри оболочки нарастает. Молекулы газа (роль которого в данном случае исполняет пар) постоянно сталкиваются друг с другом, ударяются о стенки оболочки и ввиду увеличения их количества и скорости перемещения все сильнее воздействуют на внутреннюю стенку оболочки.

Работа пароварок основана на этом же принципе, поскольку горячий пар существенно ускоряет приготовление пищи. В этом смысле процесс ничем не отличается от происходящего внутри оболочки кукурузного зерна. Я уже говорила, что, пока кукурузные зерна прогревались в горячем масле, я заваривала чай. Тем временем гранулы крахмала постепенно превращались в желатинообразную массу, находящуюся под давлением, которое продолжало расти. Наружные оболочки кукурузных зерен могут выдерживать такое давление лишь до определенной степени. Когда внутренняя температура возрастает до 180°C, а давление почти в десять раз превышает нормальное давление окружающей атмосферы, представление, разворачивающееся внутри кастрюли с кипящим маслом, достигает кульминации.

Я слегка встряхнула кастрюлю и услышала, как внутри нее раздался первый, пока еще глухой хлопок. Через пару секунд звуки, исходившие из кастрюли, напоминали короткие очереди, выпускаемые из маленького

автомата; крышка кастрюли начала слегка подпрыгивать, словно по ней стреляли изнутри. Каждый отдельный хлопок-выстрел сопровождался весьма впечатляющим выбросом пара из-под крышки кастрюли. Я буквально на мгновение отошла от плиты за чашку, но этих нескольких секунд хватило, чтобы давление изнутри приподняло крышку кастрюли и в воздух поднялось пенообразное облако.

В момент катастрофы правила меняются. До этого фиксированный объем водяного пара удерживается внутри оболочки, и давление, оказываемое им на ее внутренние стенки, увеличивается по мере повышения температуры. Но когда твердая оболочка наконец уступает давлению, ее содержимое попадает под воздействие атмосферного давления в остальной части кастрюли, то есть ограничение на объем снимается. Крахмалистая желатинообразная масса по-прежнему полна горячих удаляющихся молекул, но они уже не испытывают противодействия снаружи. В результате происходит ее взрывообразное расширение, которое продолжается до тех пор, пока внутреннее давление не сравняется с наружным. Компактная белая желатинообразная масса превращается во вспушенную пену, увеличивающуюся в объеме; кукурузные зерна выворачиваются наизнанку. По мере охлаждения масса затвердевает. Трансформация завершена.

Поворошив ложкой содержимое кастрюли, мне удалось выявить несколько жертв эксперимента. Подгорелые нелопнувшие зерна усеивали дно кастрюли. Если наружная оболочка зерна повреждена, то в процессе нагревания водяной пар свободно из нее выходит и давление внутри оболочки не нарастает. Причина, по которой кукурузные зерна при нагревании лопаются, в отличие от зерен других злаков, заключается в том, что оболочки последних имеют пористую структуру. Если зерно чересчур сухое (возможно, потому что урожай собран в неподходящее время), влаги внутри оболочки оказывается недостаточно для создания давления, позволяющего ее разорвать. А без разрушительного воздействия взрыва несъедобное зерно останется несъедобным.

Я выплеснула в окно остатки чая и идеально приготовленного мной попкорна. За окном по-прежнему хлестал дождь и завывал ветер. Как видите, разрушение — это не всегда плохо.

* * *

В простоте есть своя прелесть. Однако еще больше удовольствия мне доставляет красота, возникающая из сложности. Законы, которые описывают поведение газов, напоминают мне оптические иллюзии, когда вам кажется, что вы видите что-то одно, но, зажмурившись на секунду, а потом открыв глаза, созерцаете нечто совершенно иное.

Наш мир состоит из атомов. Каждая из этих крошечных частиц материи представляет собой оболочку из отрицательно заряженных электронов, неизменных спутников тяжелого положительно заряженного ядра атома. Химия, по сути, — история об этих спутниках, обслуживающих несколько атомов, но всегда подчиняющихся строгим правилам квантового мира и удерживающих плененные ими ядра в более крупных структурах, называемых молекулами. В воздухе, которым я дышу, когда пишу эти строки, присутствуют пары атомов кислорода (каждая такая пара — одна молекула кислорода), которые движутся со скоростью 1400 км/ч, соударяясь с парами атомов азота, которые движутся со скоростью 320 км/ч, а затем, возможно, отскакивая от молекулы воды, летящей со скоростью свыше 1600 км/ч. Все это выглядит ужасно сложно и беспорядочно — разные атомы, разные молекулы, разные скорости, — причем в каждом кубическом сантиметре воздуха содержится примерно $30\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$ (3×10^{19}) отдельных молекул, каждая из которых сталкивается приблизительно миллиард раз в секунду с другими молекулами. Вам может показаться, что самый разумный подход в данном случае — послать все это куда подальше и заняться чем-нибудь более понятным, например хирургией мозга, экономической теорией или взломом суперкомпьютеров. Одним словом, чем-то попроще. В конце концов, ученые, которые в свое время открыли законы поведения газов, вполне обходились без знания всех этих нюансов. У невежества есть свои преимущества. Теория об атомах вообще не была частью науки вплоть до начала XIX века, а неопровержимые доказательства существования атомов появились примерно в 1905 году. В далеком 1662-м в распоряжении Роберта Бойля и его помощника Роберта Гука была лишь стеклянная посуда, ртуть, пузырь с закачанным в него воздухом — и умеренная порция невежества. Они выяснили, что при возрастании давления, оказываемого

на пузырь с воздухом, его объем уменьшается. В этом и заключается суть закона Бойля, который гласит, что давление газа обратно пропорционально его объему. Спустя столетие Жак Шарль обнаружил, что объем газа (при одном и том же давлении) прямо пропорционален его температуре. Если температуру газа повысить вдвое, его объем также увеличится в два раза. Невероятно! Как же свести все сложности, касающиеся атомов, к чему-то более простому и упорядоченному?

* * *

Последний вдох, одно уверенное движение могучим хвостом — и огромное млекопитающее скрывается в морской пучине. Весь запас воздуха, необходимый этому кашалоту, чтобы провести следующие сорок пять минут под водой, уместается в его теле. Охота начинается! Добыча — гигантский кальмар, монстр, вооруженный щупальцами, устрашающими присосками и наводящим ужас клювообразным выступом. Чтобы отыскать его, кашалоту приходится нырять на достаточно большую глубину, куда никогда не проникает солнечный свет. Типичная глубина погружений кашалота — 500–1000 метров, а рекордная — примерно 2 километра. Кашалот «прощупывает» водную толщу своим высокочувствительным сонаром, ожидая получить слабый эхосигнал, указывающий на то, что добыча где-то рядом. А гигантский кальмар спокойно плывет на глубине и ничего не подозревает, ведь он глухой.

Самое ценное, что берет с собой кашалот, отправляясь за добычей, — это кислород, требуемый для поддержания химических реакций, которые снабжают питанием мышечные ткани животного и сохраняют ему жизнь. Но газообразный кислород, поставляемый из атмосферы, на глубине становится источником проблем. Фактически, как только кашалот начинает погружение, воздух в его легких превращается в проблему. В ходе погружения кита вес каждого очередного метра воды оказывает дополнительное давление на его тело. Молекулы азота и кислорода сталкиваются друг с другом и внутренними стенками легких, и каждое такое столкновение означает микротолчок. Когда кашалот находится на поверхности воды, такие микротолчки, оказываемые на его тело снаружи и изнутри, уравновешивают друг друга. Но когда гигант опускается на некоторую

глубину, на него дополнительно давит водная толща, находящаяся над ним, и толчок снаружи превосходит толчок изнутри. В результате стенки легких вдавливаются внутрь до установления равновесия, при котором давление снаружи и изнутри снова сбалансировано. Это достигается за счет того, что при сжатии легких кашалота для каждой из молекул остается меньше пространства и столкновения между ними учащаются. То есть молекулы все чаще соударяются с внутренними стенками легких животного, что приводит к повышению давления, направленного изнутри наружу. Так продолжается до установления равновесия между внутренним и наружным давлением. Десяти метров водной толщи достаточно для того, чтобы оказывать дополнительное давление, эквивалентное атмосферному. Поэтому даже на глубине, куда проникает солнечный свет и еще видна поверхность воды, объем легких кита сокращается в два раза по сравнению с их исходным объемом. Это означает, что внутренние стенки легких испытывают в два раза большее количество соударений с молекулами, вследствие чего внутреннее давление уравновешивает возросшее наружное давление. Но гигантский кальмар может скрываться на глубине до километра, а на таких глубинах объем легких должен сократиться до одного процента по сравнению с исходным объемом, то есть объемом на поверхности воды.

Но вот кашалот улавливает эхосигнал сонара. Имея лишь некоторый запас кислорода в сжавшихся легких и сонар, позволяющий ориентироваться в пространстве, кит должен приготовиться к битве в крошечной тьме. Гигантский кальмар неплохо вооружен, и даже если он в конечном счете сдастся, раны кашалота тоже будут ужасны. Откуда же ему брать силы для сражения, если в легких не останется кислорода?

Проблема уменьшившихся легких состоит в том, что, когда их объем составляет лишь одну сотую от того, который был на поверхности, давление газа внутри легких в сто раз превышает атмосферное давление. На альвеолах, нежной и чувствительной части легких, где кислород поступает в кровь, а углекислый газ удаляется из нее, это повышенное давление приводило бы к растворению в крови кашалота дополнительного количества кислорода и азота. Результатом стала бы ситуация, которую водолазы называют «кессонной болезнью»: когда кит всплыл

бы на поверхность, в его крови образовались бы пузырьки избыточного азота, что могло бы повлечь за собой тяжелейшие последствия для организма. Эволюционное решение — полностью перекрыть альвеолы с момента, когда кашалот покидает поверхность воды. Альтернативы нет. Но животное может задействовать свои энергетические резервы, поскольку его кровь и мышцы способны запастись огромным количеством кислорода. В крови кашалота вдвое больше гемоглобина и в десять раз больше миоглобина (белка, который используется для хранения энергии в мышцах), чем в крови человека. Пока кит находится на поверхности, он «перезаряжает» эти огромные энергетические резервуары. Кашалоты никогда не пользуются легкими при глубоких погружениях. Это для них слишком опасно. Они не делают как можно более глубокий вдох, перед тем как отправиться на глубину. Они существуют и борются за счет запасов, накопленных в мышцах во время пребывания на поверхности.

Никто никогда не видел сражения между кашалотом и гигантским кальмаром. Но в желудках мертвых кашалотов нередко находят остатки клювов кальмаров — единственной части, которую не переваривает желудок кашалота. Таким образом, каждый кит ведет собственный «внутренний» счет одержанных побед. Когда кит-победитель возвращается к солнечному свету, его легкие постепенно расширяются и восстанавливают контакт с системой кровоснабжения. По мере снижения давления их объем снова увеличивается до тех пор, пока не достигнет исходной величины.

Как ни странно, сочетание сложного молекулярного поведения и статистики (которая обычно не ассоциируется с простотой) на практике порождает относительно простой результат. Речь действительно идет об огромном множестве молекул, огромном множестве столкновений и огромном множестве разных скоростей, но важны здесь только два фактора: диапазон скоростей движения молекул и среднее количество столкновений молекул со стенками емкости, в которую они заключены. Величина давления зависит от числа столкновений и силы каждого из них (определяемой скоростью и массой молекулы). Соотношение между внутренним давлением (вызванным всеми этими столкновениями)

и наружным определяет объем. Что же касается температуры, то она оказывает несколько иной эффект.

* * *

«Кто мне ответит: о чем мы обычно должны беспокоиться на данном этапе?» Наш учитель, Адам, носит белую рубашку, туго облегающую его круглое брюшко, — идеальный образ булочника, который готовит выпечку для какой-нибудь солдатской столовой. Обилие в его речи словечек и оборотов, характерных для диалекта «кокни», не портит общего впечатления, а, наоборот, придает Адаму дополнительный шарм. Он тычет пальцем в комок теста, лежащий перед ним на столе. Тесто прилипает к пальцу и тянется за ним, как живое; впрочем, оно и впрямь живое. «Чтобы испечь хороший хлеб, — объявляет Адам, — нужен воздух». Я учусь в школе пекарского мастерства, где нам рассказывают, как приготовить фокаччу, традиционный хлеб итальянской кухни. Я уверена, что не надевала фартук с тех пор, как мне исполнилось десять. И хотя мне неоднократно приходилось печь хлеб, я никогда не видела теста, похожего на то, которое лежит перед Адамом. Одним словом, мне есть чему поучиться.

Следуя инструкциям Адама, мы приступаем к самостоятельному приготовлению теста с нуля. Каждый из нас смешивает свежие дрожжи с водой, затем добавляет муку и соль и месит тесто с терапевтической решительностью, способствуя выработке клейковины (глутена) — белка, который придает хлебу эластичность. Все время, пока мы формируем соответствующую физическую структуру, живые дрожжи, присутствующие в ней, заняты важной работой: ферментированием сахаров и выработкой углекислого газа. В этом тесте, как и в любом другом, которое мне приходилось когда-либо готовить, воздуха нет, зато в нем множество пузырьков углекислого газа. Тесто — тягучий и вязкий биореактор; в нем заключены продукты жизнедеятельности, поэтому оно поднимается. Когда завершается первая стадия, тесто принимает восхитительную ванну из оливкового масла и продолжает подходить, а мы тем временем чистим от его остатков ладони и стол. Каждая отдельно взятая реакция ферментации порождает две молекулы углекислого газа, которые

выделяются дрожжами. Углекислый газ, или CO_2 — два атома кислорода, присоединенные к атому углерода, — это маленькие инертные молекулы (то есть не вступающие в химические реакции с другими молекулами), обладающие при комнатной температуре достаточной энергией, чтобы свободно парить в пространстве, подобно любому другому газу. Когда эта молекула в сочетании с другими молекулами углекислого газа образует пузырек, она может часами перемещаться туда-сюда, соударяясь с другими такими же молекулами. Каждый раз при соударении происходит обмен энергией, точно так же как при соударениях бильярдных шаров. Иногда одна молекула почти останавливается, а другая приобретает удвоенную энергию и отскакивает с высокой скоростью, а иногда энергия распределяется между молекулами в иной пропорции. Каждый раз, когда какая-либо молекула сталкивается со стенкой пузырька, насыщенной глютенем, она отскакивает от нее. На этой стадии пузырьки увеличиваются, поскольку в них накапливается все большее количество молекул и их соударения с внутренними стенками пузырьков учащаются. Пузырек «надувается» до тех пор, пока наружное (атмосферное) давление не уравнивает давление молекул CO_2 изнутри пузырька. Порой при соударении со стенками пузырька молекулы CO_2 движутся быстро, порой — медленно. Пекарям, как и физикам, все равно, с какими именно скоростями те или иные молекулы CO_2 соударяются со стенками пузырька, поскольку это вопрос статистики. При комнатной температуре и атмосферном давлении 29% молекул CO_2 движутся со скоростями в диапазоне от 350 до 500 метров в секунду, но для нас это не так уж и важно.

Адам хлопает в ладоши, чтобы привлечь наше внимание, и жестом волшебника являет нашему взору поднимающееся тесто. А затем продельывает незнакомую мне манипуляцию: раскатывает тесто, покрытое оливковым маслом, и складывает его в виде конвертика. Цель — задержать внутри конвертика воздух. Я едва сдерживаюсь, чтобы не воскликнуть: «Нас разыгрывают!» — поскольку всегда считала, что весь «воздух» в хлебе — это CO_2 , выделившийся из дрожжей. Однажды в Японии я видела мастера оригами, с энтузиазмом рассказывающего своим ученикам о правильном способе наклеивания скотча при изготовлении бумажной лошадки. Свидетелем такого же нарушения здравого смысла я стала

во время урока пекарского мастерства, проводимого Адамом. Но если вам нужен воздух, то почему бы не использовать воздух? Я последовала совету мастера и послушно свернула свое тесто в виде конвертика. Через пару часов, после того как оно подошло еще сильнее и я еще раз свернула его конвертиком, а затем использовала большее количество оливкового масла, чем мне казалось разумным, моя нарождающаяся фокачча вместе с ее пузырьками была готова к отправке в печь. «Воздух» обоих типов должен был исполнить свою функцию.

Внутри печи в хлеб начала проникать энергия нагрева. Давление в печи все еще было такое, как и снаружи, но температура хлеба внезапно подскочила с 20 до 250 °С. В абсолютных единицах это соответствует скачку с 293 до 523 градусов по шкале Кельвина. Таким образом, абсолютная температура практически удвоилась*. В случае газа это означает ускорение движения молекул. Нашим интуитивным представлениям несколько противоречит тот факт, что отдельно взятая молекула не имеет собственной температуры. Газ, то есть совокупность молекул, может иметь температуру, но отдельно взятая молекула в нем — нет. Температура газа — это всего лишь способ выражения *средней* величины энергии движения молекул газа, но каждая отдельно взятая молекула постоянно ускоряет и замедляет движение, обмениваясь энергией с другими молекулами в результате соударений. Любая отдельная молекула просто обменивается энергией, которой она обладает в данный момент. Чем быстрее движутся молекулы, тем сильнее их соударения с внутренними стенками пузырьков и тем больше давление, оказываемое на пузырьки изнутри. Когда хлеб попал в печь, молекулы газа внезапно приобрели гораздо большую тепловую энергию и, соответственно, ускорили движение: его средняя скорость повысилась с 480 до 660 метров в секунду. В результате давление, оказываемое на стенки пузырьков изнутри, существенно выросло, и это повышение никак не уравнивается давлением снаружи. Каждый из пузырьков расширяется пропорционально увеличению температуры. Раздувающиеся пузырьки оказывают давление на тесто, заставляя его подниматься. Кстати, пузырьки воздуха (который в основном представляет

* О том, что означает понятие «абсолютная температура», мы поговорим в главе 6.

собой смесь азота и кислорода) расширяются точно так же, как и пузырьки CO_2 . А это и есть последний фрагмент головоломки, которого нам не доставало. Оказывается, не так уж важно, о каких молекулах идет речь. Когда удваивается температура, удваивается и объем (если давление не меняется). Или, если удваивается температура, а объем остается прежним, удваивается давление. С каким бы сочетанием разных атомов нам ни пришлось сталкиваться, это не имеет никакого значения, поскольку данная статистика остается неизменной при любой комбинации. Глядя на готовый хлеб, никто не сможет сказать, в каких пузырьках содержался CO_2 , а в каких — воздух.

Затем матрица из углеводов и белков, окружающая пузырьки, испеклась и затвердела. Размеры пузырьков зафиксировались. И перед ароматом, исходящим от мягкой белой фокаччи, было невозможно устоять.

Особенности поведения газов описываются так называемым законом идеального газа, причем такая идеализация оправдывается тем, что она не противоречит действительности. Более того, она полностью соответствует истинному положению вещей. Этот закон гласит, что для фиксированной массы газа давление обратно пропорционально его объему (если вы удваиваете давление, объем уменьшается в два раза), температура прямо пропорциональна давлению (если вы удваиваете температуру, давление повышается в два раза), а объем прямо пропорционален температуре — при фиксированном давлении. Неважно, о каком именно газе идет речь; для нас имеет значение только количество его молекул, то есть масса рассматриваемого газа. Закону идеального газа подчиняется и двигатель внутреннего сгорания, и шары, наполненные теплым воздухом, и даже попкорн. Он применим не только к газу, который нагревается, но и к газу, который охлаждается.

* * *

Достижение Южного полюса стало важнейшей вехой в истории человечества. Великие полярные исследователи — Амундсен, Скотт, Шеклтон и другие — безусловно, легендарные личности, а книги об их успехах и поражениях — одни из самых пронзительных повествований всех времен. И словно тех огромных трудностей, которые пришлось преодолевать этим

отважным людям — невообразимого холода, нехватки пищи, жестоких океанических бурь, одежды, которая явно не соответствовала суровым климатическим условиям, — было недостаточно, против них, в буквальном смысле слова, обернулся могущественный закон идеального газа.

Центр Антарктики — высокое, безжизненное сухое плато, покрытое толстым слоем льда, хотя там никогда не падает снег. Поверхность льда отражает почти весь тусклый солнечный свет обратно в окружающее пространство, а температура опускается ниже -80°C . Природа пребывает в состоянии полного оцепенения. На атомарном уровне наблюдается такое же оцепенение: атмосфера неподвижна, поскольку молекулы воздуха обладают слишком малыми энергиями (из-за очень низкой температуры окружающей среды) и перемещаются довольно медленно. Воздушные массы сверху опускаются на плато, и лед принимает на себя их тепло. Холодный воздух становится еще холоднее. Давление не меняется, поэтому этот воздух уменьшается в объеме и уплотняется. Молекулы сближаются друг с другом, движутся медленнее, не имея возможности достаточно сильно выталкиваться наружу, чтобы противодействовать окружающему их воздуху, который заталкивает их внутрь. Так как уровень плато снижается в направлении от центра континента к океану, этот холодный уплотненный воздух также непрерывно соскальзывает в направлении от центра вдоль поверхности, подобно замедленному воздушному водопаду. Потoki воздуха направляются через обширные долины, набирая скорость по мере соскальзывания в сторону океана — всегда только в сторону океана. Это так называемые нисходящие ветры Антарктики. И если вы намерены совершить путешествие к Южному полюсу, имейте в виду: на протяжении всего пути ветер будет дуть вам в лицо. Трудно придумать более неприятный сюрприз, который бы природа могла преподнести полярным исследователям.

«Нисходящий» (еще его называют кататический) — это просто название подобных ветров, которые встречаются во многих местах планеты; и они необязательно холодные. Когда они снижаются, малоподвижные молекулы такого воздуха постепенно прогреваются — правда, незначительно. Впрочем, последствия этого прогрева могут быть поистине драматическими.



[Почитать описание, рецензии
и купить на сайте](#)

Лучшие цитаты из книг, бесплатные главы и новинки:

