

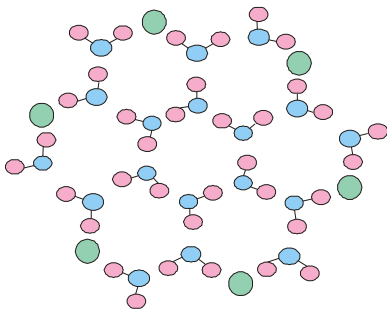
Снежинки и ледяные узоры на стекле

С.ВАРЛАМОВ

В СЕМ ВАМ, КОНЕЧНО ЖЕ, ПРИХОДИЛОСЬ РАЗГЛЯДЫВАТЬ снежинки или ледяные узоры на окнах. Лед в этих случаях образуется непосредственно из пара.

При медленной конденсации водяных паров молекулы воды образуют почти плоскую структуру (кластер), которая имеет осевую симметрию шестого порядка, т.е. при повороте на 60° она переходит сама в себя. Заметим, что это только один из множества возможных способов объединения молекул воды в кристалл льда.

На схематическом рисунке атомы кислорода в молекулах изображены синим цветом, атомы водорода — красным. Хорошо видно, что некоторые места в структуре (они отмечены зеленым цветом)



могут заполнить только молекулы воды, ориентированные не в плоскости рисунка, потому что к тому месту, где должен находиться отрицательно заряженный атом кислорода, уже обращены два атома водорода соседних молекул.

Заполнение этих мест молекулами при росте кристалла льда происходит с меньшей скоростью или вовсе не происходит (это связано с глубиной соответствующей потенциальной ямы для этого места).

Поперечные размеры правильной снежинки отличаются во много раз, т.е. отношение диаметра снежинки к ее толщине может достигать нескольких десятков. Это отношение характеризует скорость роста снежинки в соответствующем направлении. При росте кристалла возможны разные способы (последовательности) заполнения энергетически выгодных позиций, что обеспечивает получение кристаллов (снежинок) разной формы. Реализация конкретного способа роста — случайное событие, поэтому совершенно одинаковые по форме снежинки встречаются крайне редко. Попробуйте продолжить построение нарисованного кластера, и вы сразу увидите, как появляются возможности разветвления: достаточно увеличить радиус кластера на величину, соответствующую диаметру одной шестиугольной соты, и возникает очередное ветвление.

Давайте оценим сверху количество N возможных вариантов форм наших гипотетических снежинок-кластеров радиусом $R = 2$ мм. Размер соты имеет порядок величины $D = 6 \cdot 10^{-10}$ м. Отношение R/D равно степени двойки (ветвления):

$$R/D \approx 3,3 \cdot 10^6, \text{ и } N \leq 2^{3300000} \approx 10^{1000000}.$$

Конечно, это фантастически завышенная оценка. Дело в том, что реализация того или иного направления при ветвлении имеет разную вероятность. Связано это с тем, что взаимодействия не только соседние молекулы, но и молекулы, удаленные друг от друга на значительные расстояния.

Условия конденсации пара и превращения его в лед на поверхности стекла отличаются от условий, при которых в воздухе образуются снежинки. Внутри помещения влажность воздуха обычно существенно меньше 100%, но вблизи холодной поверхности оконного стекла температура может оказаться гораздо ниже точки росы при данной концентрации молекул воды в воздухе. И на стекле появится лед.

Вид узора на поверхности стекла зависит от большого набора параметров. Перечислим некоторые из них: температура внутри помещения и температура снаружи, влажность

воздуха в помещении, толщина стекла и загрязненность его поверхности, наличие и скорость воздушных потоков вблизи стекла (в частности, наличие или отсутствие щелей в оконной раме или трещин в стекле) и т.д.

Замечательные ледяные узоры часто образуются зимой на стеклах автобусов или троллейбусов. При этом слой льда может достигать нескольких миллиметров. Источником водяного пара является, разумеется, дыхание пассажиров. Сначала на поверхности стекла образуется водяная пленка толщиной в несколько диаметров молекул. Молекулы воды в ней испытывают сильное влияние молекул поверхности стекла. Хотя вода в пленке переохлаждена, но возможности для превращения воды в лед не возникает. По мере увеличения толщины пленки и уменьшения влияния молекул поверхности стекла в воде возникают центры кристаллизации. Рост кристаллов происходит во всевозможных направлениях, но самые большие кристаллы растут вдоль поверхности стекла. Скорости роста кристалла в различных направлениях тоже существенно различаются. Можно повторить, что взаимное

влияние соседних и удаленных друг от друга молекул определяет вероятность заселения той или иной «вакансии» в растущем кристалле. С этим, по-видимому, связана форма (степень кривизны) растущих на поверхности стекла ледяных узоров. Когда толщина ледяного панциря на стекле становится настолько большой, что отвод тепла наружу замедляется, кристаллы льда начинают расти в перпендикулярном стеклу направлении. Стекло как бы покрывается шубой из ледяных иголок.

Скоро наступит зима, и вы сможете легко убедиться в том, что снежинки действительно имеют разнообразные симметричные красивые формы. Сама снежинка, можно сказать, представляет собой застывший случайный процесс. А если, сидя в автобусе возле покрытого морозными узорами стекла, вы сможете своим теплым дыханием «продышать» во льду окошечко для наблюдения, обратите внимание на то, как быстро это окошко вновь зарастает льдом – кристаллы льда растут быстрее, чем движется минутная стрелка ваших наручных часов.