

Наблюдения над утренней чашкой кофе

В. Шефер

Эта статья заимствована нами из журнала «Успехи физических наук» (1972г., том 108, выпуск 3).

Автор статьи Винсент Дж. Шефер является директором Исследовательского центра по изучению атмосферы при Университете штата Нью-Йорк в Олбэни, США.

Статья печатается с некоторыми сокращениями.

Внимательные наблюдения над повседневными явлениями позволяют узнать многое о природе физических процессов.

Можно наблюдать много чрезвычайно интересных химических и физических явлений, если чашку очень горячего черного кофе осветить сильным пучком света, параллельным поверхности жидкости. Первый раз я наблюдал эти явления, глядя вдоль края кипящих источников зимой в Йеллоустонском парке¹. Через несколько лет я обнаружил их вновь за утренней чашкой кофе, вскоре после восхода Солнца. На этот раз все происходило в сухом воздухе Северной Аризоны.

В Йеллоустоне наблюдение было часто затруднено влагой, поднимающейся от горячей воды, которая конденсировалась в воздухе и большую часть времени скрывала от глаз наблюдателя поверхность жидкости. В Аризоне, наоборот, чистый воздух раннего утра и яркий свет восходящего Солнца создавали идеальные условия для наблюдения интересных эффектов, к описанию которых я и хочу приступить.

Если наполнить чашку до краев черным кофе (быстрорастворимым или обычным), близким к закипанию, и посмотреть на него при подходящем освещении, то первое, что бросится в глаза, это причудливые ячейки, которые образуются на поверхности кофе под поднимающимся паром (см. рисунок). Ячейки поперечным размером от 1 до 3 см имеют форму неправильных многоугольников и выглядят как пыльные светлые пятна, ограниченные узкими темными линиями. Пятнами отмечаются места выхода на поверхность восходящих потоков горячей жидкости. Затем эти потоки растекаются по поверхности, слегка охлаждаются и в тех местах, которые отмечены темными линиями, вновь погружаются внутрь кофе, образуя структуру, известную под названием вихревых ячеек Бенара.

Эти ячейки присутствуют во всех жидкостях и газах в тех случаях, если их нижние слои имеют более высокую температуру, чем верхние. Не важно, чем создан такой перепад температуры: тем ли, что жидкость подогревается снизу или охлаждается сверху, – существенно только, чтобы температура уменьшалась снизу вверх. Явление может проявляться в самых разных масштабах. Француз Анри Бенар, который в 1900 году впервые заметил его, пользовался для наблюдений микроскопом². Однако это явление можно видеть и в облаках над землей, и на поверхности воды в морях, и даже в структуре фотосферы Солнца.

На поверхности горячего кофе ячейки Бенара хорошо видны благодаря следующему явлению. Интенсивный поток молекул водяного пара, поднимающегося от горячей поверхности кофе, действует на непосредственно прилегающие к поверхности жидкости слои более холодной атмосферы с силой, направленной вверх. Большая часть водяных капель, конденсирующихся в насыщенном влагой воздухе, либо опускается назад в жидкость, либо поднимается в атмосферу и испаряется в ней. Однако имеются и такие капельки, которые слишком велики, чтобы подняться в

верхние слои воздуха, и одновременно – слишком малы, чтобы их сила тяжести могла преодолеть давление восходящего потока молекул воды, поднимающихся с поверхности горячей жидкости. В результате сила тяжести этих сконденсированных капелек уравнивается силой давления вылетающих с поверхности жидкости молекул, так что капельки оказываются взвешенными в воздухе над поверхностью горячего кофе. На границах же ячеек Бенара имеется нисходящий поток пара, капельки оседают, и здесь черная поверхность кофе обнажается. Если воспользоваться микроскопом, обладающим небольшим увеличением, то можно заметить, что пылевидные пятна над восходящими потоками горячего кофе состоят из плотно упакованных крошечных однородных водяных капелек. Размеры капелек и высота их локализации над уровнем жидкости определяются давлением паров воды, числом центров конденсации в данном объеме и силой тяжести.

То, что число и размеры капелек определяются наличием центров конденсации, можно доказать с помощью зажженной спички, поднесенной ниже края чашки. Пламя спички создает, как известно, дополнительные центры конденсации³, в результате чего концентрация капелек резко уменьшается, размеры их становятся заметно меньше, и они локализуются ближе к поверхности горячей жидкости.

Если поверхность жидкости осветить ярким горизонтальным параллельным пучком света (например, лучами восходящего Солнца, световым пучком из проектора для диапозитивов или из яркого фонаря) и вести наблюдение в направлении освещения и близко к оси светового пучка, то над поверхностью темной жидкости можно увидеть спектрально разложенный свет. Явление дифракции света на мелких капельках в высоких слоях атмосферы приводит иногда к появлению окраски венцов вокруг Солнца или Луны, когда они закрываются облаками, состоящими из почти однородных капелек⁴.

Искусный и настойчивый экспериментатор может заметить также характерное и довольно любопытное электрическое явление. Если к поверхности жидкости поднести наэлектризованный предмет (например, эбонитовую гребенку), то взвешенные в воздухе капельки влаги исчезают. Это показывает, что капельки сильно заряжены. Если же наэлектризованный предмет заряжен не очень сильно, то одновременно с наличием вблизи поверхности жидкости стабильной зоны уравновешенных капелек возникает поток капелек, конденсирующихся на ионах, распространяющихся от заряженного тела.

Чашка горячего кофе является идеальным прибором для наблюдения всех или некоторых из описанных явлений. Однако по мере остывания кофе эффекты быстро ослабевают. Для более продолжительных наблюдений я пользовался следующим устройством. Чисто вымытая жестянка из-под консервов наполнялась водой, подкрашенной черными чернилами, и подогревалась на горячей подставке. В качестве горячей подставки служил электрический утюг, перевернутый вниз ручкой, которая зажималась в настольные тиски. Это приспособление позволяло проводить наблюдения сколь угодно долго. Прекрасным источником света служил проектор для показа диапозитивов, а наблюдать расположение, размеры и другие характеристики «плавающих» капелек можно было в микроскоп. Впоследствии я обнаружил, что горячий глицерин еще лучше подходит для продолжительных исследований.

Грязь на поверхности жидкости в некоторых случаях может подавить интересующие нас эффекты, однако ее легко удалить. Для этого к поверхности жидкости нужно прикоснуться

кусочком газетной или другой бумаги и тут же его убрать. Загрязняющая поверхность жидкости мономолекулярная пленка постороннего вещества (или пыль) высадится на поверхности бумаги и останется на ней. Для очистки поверхности горячей жидкости может потребоваться несколько таких операций, выполняемых каждый раз с новым куском бумаги. Разумеется, не представляет труда намеренно загрязнять поверхность кофе или другой жидкости для того, чтобы исследовать влияние постороннего молекулярного покрытия на описанные явления.

Начать опыты, по-видимому, лучше всего с глицерином или с подкрашенной чернилами водой, не расходуя кофе.

¹ Йеллоустонский Национальный парк известен своими горячими источниками и особенно гейзерами.

² При отсутствии посторонних возмущений на поверхности жидкости видна почти правильная сетка шестиугольных завихрений, причем по оси каждой ячейки жидкость поднимается, а вдоль ее внешних границ стекает вниз.

³ Под действием пламени спички часть молекул воздуха ионизируется. Образовавшиеся ионы действуют как центры конденсации.

⁴ Более подробно о явлении дифракции света на мелких капельках можно прочитать, например, в книге М. Миннарта «Свет и цвет в природе» (М., «Наука», 1909 г., с. 222 и далее). Заметим только, что дифракция света на капле происходит точно так же, как на круглом отверстии в экране.