1972 г. Ноябрь Том 108, вып. 3

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

532.529

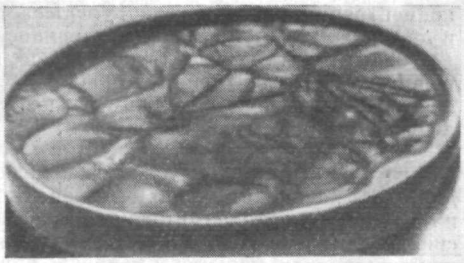
НАБЛЮДЕНИЯ НАД УТРЕННЕЙ ЧАШКОЙ КОФЕ *)

В. Шефер

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

Можно наблюдать много чрезвычайно интересных химических, физических и оптических 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 парке [1**]). 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 бо́льшую 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 бросается 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 белые 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 [2*].

Эти конвективные ячейки присутствуют во всех жидкостях и газах, нестабильность которых обусловлена тем, что их нижние слои имеют более высокую температуру, чем верхние. Не важно, чем создан такой градиент 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 г. впервые заметил его, пользовался для наблюдений микроскопом ***). Однако это явление можно видеть

*) Vincent J. Schaefer, Observations of an Early Morning Cup of Coffee, Am. Scientist 59, 534 (1971). Перевод В. К. Игнатовича, под редакцией И. А. Яковлева.

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

**) Йеллоустонский Национальный парк известен своими гидротермальными источниками и особенно гейзерами. (*Прим. перев.*)

***) 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. Расстояние между осями соседних конвективных ячеек примерно в 3,3 раза больше глубины слоя жидкости, охваченного каждой ячейкой. (*Прим. ред.*)

и в облаках над землей и на поверхности воды в морях и даже в гранулярной структуре фотосферы Солнца [3*].

На поверхности горячего кофе ячейки Бенара хорошо видны благодаря явлению, известному под названием потоков Стефана. Фактически наблюдение ячеек является одним из наиболее изящных способов заметить достаточно неуловимое явление, названное в честь открывшего его Йозефа Стефана (1835—1893) *). 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. Бо́льшая 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 вес мог преодолеть давление восходящего потока молекул воды, поднимающихся с поверхности горячей жидкости. В результате вес этих сконденсированных капелек уравновешивается 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 бинокулярным 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 направленным вверх давлением паров воды, числом центров конденсации в данном объеме и силой тяжести.

Если поднести к поверхности жидкости наэлектроизованный предмет, например эбонитовую гребенку, то все взвешенные капельки исчезают. Это показывает, что капельки сильно заряжены, благодаря чему их размеры устойчивы **).

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

Если вместо наэлектризованной гребенки поднести к поверхности источник радиоактивного излучения, то капельки тоже исчезают, поскольку происходит коалесценция и выросшие капельки оседают вниз ***). Однако этот способ удаления капелек значительно менее эффективен, чем действие заряженной гребенки.

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 [6] в высоких слоях атмосферы приводит иногда к появлению окраски венцов вокруг Солнца или Луны, когда они закрываются облаками, состоящими из почти однородных капелек. Венцы можно наблюдать также сквозь «перламутровые облака», иногда принимающие форму линз, и в волнистых облачках, которые состоят из маленьких капелек одинакового размера и представляются то красными, то голубыми, то зелеными, если рассматривать их в направлении Солнца *****).

На поверхности горячего черного кофе, покрытого причудливым узором ячеек Бенара, можно заметить еще одно любопытное явление. Наряду с темными полосами, которые отмечают места нисходящих потоков жидкости, сероватые слои взвешенных

---

*) Речь идет об австрийском физике И. Стефане, имя которого вошло в историю физики в связи с открытым им на опыте законом интегрального излучения абсолютно черного тела. (*Прим. ред.*)

**) См., например, [4*]. (*Прим. ред.*)

***) Автор не указывет, каким источником радиоактивного излучения он пользовался. Наиболее эффективным в этом случае является излучение α-частиц, причем рост размеров капелек при облучении будет происходить не за счет их коалесценции, а за счет ускоренной конденсации паров на поверхности заряженных капелек после достижения ими некоторого характерного значения радиуса (см., например, [5*]). (*Прим. ред.*)

****) Автор, в сущности, рекомендует пользоваться для наблюдений классической оптической схемой ультрамикроскопа Зидентопфа — Жигмонди. Сейчас, если не интересоваться спектральным разложением света, этот опыт удобно делать с маломощным газовым лазером. (*Прим. ред.*)

*****) Автор для классификации облаков пользуется собственной довольно произвольной терминологией (см., например, [7*]). (*Прим. ред.*)

в атмосфере капелек внезапно пересекаются другими темными линиями. Причиной возникновения этих линий являются крошечные вихри, образующиеся вследствие того, что поднимающийся горячий влажный воздух адиабатически расширяется и охлаждается. Мимолетные вихри длятся большей частью очень короткое время — порядка миллисекунд.

Искусный и настойчивый экспериментатор может заметить также характерное и довольно любопытное электрическое явление. Если наэлектризованный предмет, например гребень, подносимый к поверхности жидкости, заряжен не очень сильно, то при наличии вблизи поверхности стабильной зоны уравновешенных капелек в направлении заряженного тела возникает порожденный электрическим ветром поток капелек. В зависимости от формы контуров подносимого к жидкости заряженного тела может возникнуть один или несколько таких потоков капелек, конденсирующихся на ионах, распространяющихся от заряженного тела. При наблюдении этого явления впервые я обходился несколькими зубцами наэлектризованной гребенки.

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 старый, но исправный 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 бинокулярный микроскоп. Впоследствии я обнаружил, что горячий глицерин лучше подходит для продолжительных исследований. Большее, чем у воды, значение его показателя преломления и очень низкое давление пара позволяют производить такие эксперименты, которые в случае воды оказываются довольно затруднительными.

Когда жидкость настолько нагреется, что над ее поверхностью появятся капельки, их можно удалить, создав вихревое движение воздуха и паров. Для этого к поверхности жидкости нужно поднести вертикально кусок тонкого, но жесткого картона или тонкую металлическую пластинку. Движение воздуха, вращающегося вокруг вертикального края тонкой пластинки, хотя и очень медленное, приводит к образованию вихря, который в чрезвычайно нестабильном слое воздуха, расположенном над горячей жидкостью, продолжает развиваться.

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 высадятся на поверхности бумаги и останутся на ней. Для очистки поверхности горячей жидкости может потребоваться несколько таких операций, выполняемых каждый раз с новым кусочком бумаги. Хотя метод очистки поверхности жидкости от пленок с помощью бумаги прост и эффективен, тем не менее для более продолжительных исследований удобнее пользоваться небольшой кюветой Лэнгмюра [8].

Разумеется, не представляет труда намеренно загрязнять поверхность кофе или другой жидкости для того, чтобы исследовать влияние постороннего молекулярного покрытия на описанные явления. Можно ожидать, что монослой гексадеканола [9], который столь эффективно уменьшает испарение воды с поверхности водных резервуаров, будет препятствовать образованию плавающих капелек, однако оказывается, что такой монослой не влияет на испарение горячей воды. Это, по-видимому, происходит от того, что пленка гексадеканола в этом случае жидкая. Поскольку температура плавления гексадеканола 49,3 °С, избыток гексадеканола над монослоем распределяется в виде линзообразных капелек, а не меленькими «островками» порошка, который приводит к образованию столь эффективной пленки, препятствующей испарению, в случае, когда производится покрытие поверхности холодной воды.

С другой стороны, видимая невооруженным глазом пленка манометрического масла, которая нисколько не замедляет испарения воды из холодных резервуаров, оказывается чрезвычайно эффективной для прекращения потоков Стефана.

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

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА *)

1. V. J. Schaefer, Report of the Third Yellowstone Field Research Expedition (January 8 — February 5, 1963), ASRC Publ. 13 (Atmospheric Science Research Center, State University of New York at Albany), 1963, p. 79.

*) Литература, отмеченная звездочкой, добавлена редактором перевода. (*Прим. перев.*)

2*. H. Benard, Ann. de Chimie et Phys. **23**, 62 (1901).
3*. А. Унзольд, Физика звездных атмосфер, И., ИЛ, 1949.
4*. М. А. Леонтович, Введение в термодинамику, М., Гостехиздат, 1951.
5*. Н. Дас Гупта, С. Гом, Камера Вильсона и ее применение в физике, М., ИЛ, 1947.
6. М. Миннарт, Свет и цвет в природе, М., «Наука», 1969.
7*. Б. Мейсон, Физика облаков, Л., Гидрометеоиздат, 1961.
8. I. Langmuir, V. J. Schaefer, J. Am. Chem. Soc. 59, 1762 (1937); V. J. Schaefer, J. de Rech. Atmosph. **11**, 141 (1966).
9. I. Langmuir, V. J. Schaefer, J. Franklin Inst. **235**, 119 (1945).