

сориться или окислиться аварийный клапан, сделанный в нижней части мокки именно для того, чтобы дать выход пару в случае его незапланированного перегрева. Поэтому становятся опасными старые кофеварки. Второй причиной «катастрофы» может стать непроходимость самого фильтра, заполненного кофейным порошком. Тому могут быть различные причины. Самая экзотическая, в духе детектива о жизни неаполитанской мафии: изощренный киллер забил верхнюю трубочку спитым кофе, оставшимся в невымытой кофеварке со вчерашнего дня. Более реальная такая: плотно утрамбованный (по незнанию, чтобы получилось крепче) кофейный порошок слишком мелкого для мокки помола становится непроницаемым для воды. Под действием продолжающегося нагрева давление в нижнем сосуде вырастет недопустимо высоко, вода пробьет себе канал в фильтре и сорвет верхнюю часть кофеварки с резьбы. С чем же связана такая непроницаемость фильтра?

Оказывается, все дело в ограниченности применимости закона Дарси. Действительно, линейный закон фильтрации написан без учета капиллярных явлений. Пористую среду можно представить как сложную систему соединенных пустот и капилляров. Жидкость может протекать через капилляр радиусом  $r$  только в том случае, когда разность давлений на концах капилляра превышает  $2\sigma/r$ , где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения. Разность давлений на концах капилляра можно оценить как  $\Delta p/N$ , где  $\Delta p$  – разность давлений на фильтре, а  $N$  – среднее число капилляров, укладываемых на толщине фильтра. Возьмем для оценки  $N \sim 10$ ,  $\Delta p \sim 10^4$  Па,  $\sigma = 0,07$  Н/м. Получим, что уже при среднем радиусе капилляров  $r \sim 0,1$  мм часть из них могут оказаться запертыми для протекания жидкости при нормальной разности давлений на фильтре.

На первый взгляд, в этом нет ничего страшного – ведь часть капиллярных пор окажутся большего радиуса и будут способны пропускать жидкость. Однако более внимательный анализ показывает, что этого может оказаться недостаточно. Необходимо потребовать, чтобы доля незапертых пор была больше некоторого критического значения. В

противном случае система открытых пор не будет пронизывать фильтр от одной границы до другой; двигаясь по этим порам, мы сможем сделать только несколько шагов и неизбежно уткнемся в непроницаемый капилляр. Говорят, что в этом случае система открытых пор потеряла «связность» и перестала пронизывать все пространство, она раздробилась на множество небольших групп из соединенных друг с другом пор (такие группы называют кластерами).

Свойства систем с нарушенной или ограниченной связностью изучает специальный раздел статистической физики, называемый теорией перколяции (от percolation – протекание). Критическая концентрация (доля) элементов, при которой система теряет связность, носит название порога перколяции. Теория перколяции изучает не только условия прекращения протекания (тока, жидкости) сквозь систему, но и свойства так называемого слабого протекания, т.е. чуть выше порога перколяции (когда протекание идет по малому числу сквозных капиллярных проходов). Оказывается, зависимость интенсивности протекания от концентрации свободных пор (которая в нашем случае зависит от давления) носит сложный степенной характер (с дробным показателем степени), т.е. совсем не похожа на закон Дарси, который вступает в силу только тогда, когда протекание происходит по развитой системе пронизываемых пор.<sup>2</sup>

Однако вернемся к нашему кофейному фильтру. В этом случае доля пронизываемых пор зависит от разности давлений на фильтре и от среднего радиуса пор, который, в свою очередь, зависит от степени измельчения кофе. При излишнем измельчении порошка средний радиус пор уменьшается, а их число на толщине фильтра увеличивается; в результате и система может оказаться непроницаемой вплоть до пороговой разности давлений в несколько атмосфер. А дальше может произойти следующее. В сжатом избыточном давлением фильтре будет еще силь-

нее уменьшаться средний радиус пор, что приведет к росту пороговой разности давлений, а это – к дальнейшему прессованию кофе в фильтре... Короче говоря, образуется порочный замкнутый круг: температура в нижнем сосуде будет расти, вместе с ней будет расти и давление. Наконец, при некотором давлении вода все же пробьет себе канал и прорвется сквозь фильтр. В лучшем случае вы получите плохой кофе – ведь была использована лишь малая часть засыпанного порошка, да и температура слишком высока. В худшем – давление поднимется настолько, что резьба не выдержит, и кофеварка взорвется.

Оценим максимальный (теоретический) ущерб, который может нанести мокка, превратясь в тепловую бомбу. Будем исходить из худшего: забилось все, что могло забиться, и 150 г воды разогреваются в замкнутом объеме, ненамного превышающем объем самой воды. При температуре порядка критической (где плотность пара сравнивается с плотностью воды), которая для воды равна  $T_k = 373$  °C = 646 К, вся вода превратится в пар. Дальнейшее нагревание возможно, но сама мокка станет светиться – такого еще никто не видел. Итак, для предельной оценки допустим, что закупоренная мокка разогрелась до температуры порядка  $T = 600$  К. Записав уравнение Менделеева–Клапейрона, можно легко оценить давление в нижней части:

$$p = \frac{m}{M} \frac{RT}{V}.$$

Полагая  $m = 150$  г,  $V = 200$  см<sup>3</sup>,  $M = 18$  г/моль,  $R = 8,31$  Дж/(моль · К), найдем, что  $p \sim 10^8$  Па =  $10^3$  атм – это давление порядка имеющегося на дне Марианской впадины. Да и энергия, запасенная в кофеварке при такой температуре, впечатляет:  $E = (5/2)pV \sim 50$  кДж, так что взрыв разогнал бы отдельные части мокки до скоростей порядка сотен метров в секунду.

Из приведенных оценок понятно, что резьба не выдержит гораздо раньше. Но также очевидна и могучая сила, запасенная в кофеварке благодаря избыточному нагреву: ее действительно с лихвой хватит, чтобы не только забрызгать всю кухню несостоявшимся напитком, но и на-

<sup>2</sup> Подробнее с теорией перколяции и ее замечательными достижениями вы можете познакомиться по статье А.Эфроса «Что такое теория протекания» («Квант» №2 за 1982 год) или по книге А.Эфроса «Физика и геометрия беспорядка» (Библиотечка «Квант», выпуск 19).