

вателя), куда заливается вода, металлического фильтра, куда засыпается кофе среднего помола, и, наконец, верхнего усеченного конуса, где накапливается готовый напиток. Эта кофеварка рассчитана на приготовление напитка определенной консистенции: воду следует наливать до уровня имеющегося в нагревателе клапана, фильтр засыпают полным — примерно 6 г на порцию в 50 мл воды.

Процесс приготовления кофе в мокке весьма занимателен. В фильтр засыпается кофейный порошок и утрамбовывается, в нижнюю часть мокки заливается вода. Мокка плотно закручивается по резьбе, соединяющей верхний и нижний конусы. (Верхнее ситечко прикрывает цилиндр фильтра. Дополнительной изоляцией от внешней среды является резиновая прокладка, проложенная между верхним и нижним конусами.) Кофеварка ставится на слабый огонь. Процесс приготовления заключается в доведении до кипения воды в нагревателе, последующем ее прогоне через кофейный порошок, дальнейшем подъеме приготовленного таким образом напитка по трубке и его сливе в объем верхнего конуса. После этого кофе готов к разливу (через носик) по чашкам.

Все кажется простым и понятным. Но что является «движителем» описанного процесса? Конечно, огонь. Вначале вода нагревается до кипения, затем начинается процесс кипения в замкнутом объеме, где воде отведено гораздо больше места, чем пару над ее поверхностью. Температура переходит через 100 °С, пар над поверхностью воды все время остается насыщенным, его давление превышает 1 атм и продолжает расти. Внешнее же давление, вплоть до верхнего уровня фильтра, равно атмосферному. Насыщенный пар с тем-

пературой выше 100 °С начинает играть роль сжатой пружины, продавливающей чуть перегретый кипяток сквозь кофейный порошок, содержащийся в фильтре. При этом из кофе извлекаются все те ароматы, масла и другие компоненты, которые превращают воду в чудесный напиток. Понятно, что свойства этого напитка зависят как от самого кофейного порошка, находящегося в фильтре, так и от температуры воды и времени ее протекания сквозь фильтр. Секреты приготовления смеси кофейных зерен, их жарки и помола являются тайнами каждого изготовителя, основанными на таланте, труде и столетиях опыта. От чего же зависит время протекания жидкости через фильтр, мы можем понять без промышленного шпионажа, исходя лишь из законов физики.

В середине девятнадцатого века французские инженеры А. Дарси и Ж. Дюпюи провели первые экспериментальные наблюдения за движением воды в трубах, заполненных песком. Эти исследования положили начало созданию теории фильтрации, которая сегодня успешно применяется для описания движения жидкостей, газов и их смесей через твердые тела, содержащие связанные между собой поры или трещины. Помимо создания в городе Дижоне первой совершенной системы водоснабжения в Европе, Дарси сформулировал так называемый линейный закон фильтрации, который сегодня носит его имя. Он связывает объемный расход жидкости Q через песчаный фильтр, длина которого L , а площадь S , с разностью уровней воды ΔH над фильтром и у его основания:

$$Q = \frac{k_f S \Delta H}{L}.$$

Входящий в эту формулу коэффициент фильтрации k_f зависит как от природы пористой среды, так и от свойств протекающей жидкости. Эти свойства можно легко разделить:

$$k_f = \frac{k \rho g}{\eta},$$

заодно перейдя от разности уровней, характеризующей конкретный фильтр, к разности давлений по обе его стороны $\Delta p = \rho g \Delta H$:

$$w = \frac{k \Delta p}{\eta L}.$$

Здесь $w = Q/S$ есть так называемая скорость фильтрации, показывающая, какой объем жидкости протекает через единицу площади поверхности фильтра в единицу времени, коэффициент η характеризует вязкость жидкости, а коэффициент k является характеристикой лишь пористой среды и называется коэффициентом проницаемости (он имеет размерность площади). Следует отметить, что проницаемость, выраженная в единицах СИ, обычно очень мала. Так, для крупнозернистых песчаников это $10^{-12} - 10^{-13} \text{ м}^2$, для плотных песчаников 10^{-14} м^2 . В нефтепромысле для коэффициента проницаемости используется специальная единица — дарси (Д): $1 \text{ Д} = 1,02 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$.

Попробуем применить закон Дарси к изучению нашей мокки. Например, интересно узнать, до какой температуры перегревается кипяток в нижней части кофеварки. Оценим разность давлений между нижней и верхней сторонами фильтра по формуле Дарси:

$$\Delta p = \frac{w \eta L}{k} = \frac{m \eta L}{S \rho k t}.$$

Характерные размеры фильтра у мокки на три порции таковы: $L = 1 \text{ см}$ и $S = 50 \text{ см}^2$; масса кофе $m = 150 \text{ г}$ набегает за $t = 3 \text{ мин}$. Коэффициент проницаемости мы можем принять того же порядка, что и для крупнозернистого песчанника: $k \approx 10^{-13} \text{ м}^2$. Плотность воды $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$. С вязкостью нужно быть осторожным, так как она сильно зависит от температуры; тем не менее, в таблицах физических величин можно отыскать, что $\eta(100^\circ \text{С}) = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. В результате получаем $\Delta p \sim 10^4 \text{ Па}$. Соответствующая температура кипения воды, согласно известному графику зависимости давления насыщенного пара от температуры кипения, составляет $T^* = 105^\circ \text{С}$.

Итак, мы разобрались с нормальным процессом приготовления кофе в итальянской мокке. Однако ходят мрачные слухи о том, что временами эти кофеварки выходят из повиновения и превращаются в бомбы, угрожая потолкам и стенам кухонь, не говоря уже о находящихся поблизости любителях кофе. Из-за чего же и как это может случиться?

Ясно, что прежде всего может за-

