



№ 4, 2001 г.

А. Варламов, Дж. Балестрино

# Физика приготовления кофе

© “Квант”

Использование и распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”  
(грант РФФИ 00-07-90172)

[vivovoco.nns.ru](http://vivovoco.nns.ru)  
[vivovoco.rsl.ru](http://vivovoco.rsl.ru)  
[www.ibmh.msk.su/vivovoco](http://www.ibmh.msk.su/vivovoco)

# Физика приготовления кофе

**А.ВАРЛАМОВ, ДЖ.БАЛЕСТРИНО**

**П**УТЕШЕСТВЕННИК, СТРАНСТВУЮЩИЙ из одной страны в другую, может заметить, что в наш век стандартизации и засилия транснациональных монополий, когда одни и те же прохладительные напитки подаются в Нью-Йорке и Катманду, кофейный рынок остается на удивление пестрым и разнообразным. Напиток из одних и тех же зерен кофе приготавливают и пьют по-разному в Турции и Египте, в Италии и Франции, в Финляндии и США. Заказав кофе в баре где-нибудь в Неаполе, вы получите изящную чашечку размером чуть больше наперстка, на дне которой медленно колыхнется густая капля почти черного цвета, покрытая аппетитной пенкой. Однако сделав тот же заказ в Чикаго, вы получите пластмассовый сосуд объемом в пол-литра, заполненный горячей водой коричневатого цвета. Мы не беремся судить, какой из напитков вкуснее или полезнее, а просто обсудим различные методы приготовления кофе и связанные с ними физические процессы.

## Кипяченый кофе

Это один из старинных способов приготовления кофейного напитка, сохранившийся до наших дней на севере Скандинавии. Прожаренный и крупно помолотый кофе засыпается в воду в количестве 10 грамм на 150–190 миллилитров воды и кипятится в кофейнике примерно 10 минут. Затем напиток разливается без фильтрации по чашкам и в течение нескольких минут отстаивается. Никакой интересной физики в этом процессе нет, а от комментария вкусовых качеств данного напитка авторы воздерживаются.

## Кофеварка с бумажным фильтром

Такая кофеварка широко распространена в США, на севере Европы,

в Германии и во Франции. Ее принцип действия чрезвычайно прост, а процесс приготовления кофе занимает 6–8 минут. Кофе крупного помола засыпается в конический фильтр, изготовленный из специальной фильтровальной бумаги. Далее на помолотый кофе капает сверху горячая вода, «обмывает» его, просачивается сквозь фильтр и собирается в стеклянный сосуд. В результате получается легкий кофейный напиток: лишь немногие кофейные масла просачиваются сквозь плотный бумажный фильтр, да и крупный помол и отсутствие избыточного давления не способствуют полному извлечению всех кофейных ароматов. Американская доза составляет 5–6 г кофе на 150–190 мл воды, европейская — 10 г на чашку.



## «Кофе по-турецки»

Описание процесса приготовления такого кофе уже заслуживает внимания. Кофейные зерна перемалываются в пыль (тонкий помол), и этот порошок, часто вместе с сахаром, засыпается в металлическую (обычно медную или латунную) конусообразную кофеварку, называемую джезвой. Затем она заливается холодной водой и погружается по самое гор-

лышко в раскаленный песок (по иному рецепту молотый кофе кладется на поверхность уже горячей воды). Разогрев жидкости происходит за счет теплопередачи от песка через дно и боковые стенки джезвы. За отсутствием песка можно воспользоваться слабым огнем газовой плиты, электрической плиткой и т.д. В результате прогрева придонных слоев возникают конвекционные потоки: горячая жидкость уносит с собой вверх на поверхность частички кофе, где они, благодаря силам поверхностного натяжения, задерживаются и образуют «кофейную корочку». Постепенно содержимое джезвы доводится до кипения: сквозь корочку прорываются пузыри, образуется пена. В этот момент джезва вынимается из песка (или снимается с плиты), так как кипение «убивает» кофе.<sup>1</sup> Процедура доведения напитка до кипения повторяется еще два раза, что приводит к образованию обильной пены. Полученную жидкость разливают по небольшим чашкам и ждут, пока не уйдет на дно осадок. В результате получается вкусный густой напиток, особенно если количество воды было относительно небольшим.

К недостатку такого способа можно отнести наличие взвеси кофейного порошка в полученном напитке, который постепенно оседает на дно чашки. Имеется даже способ гадания на «кофейной гуще».

## Итальянская мokka

Одной из самых распространенных кофеварок для домашнего приготовления кофе в Италии является мokka. Она состоит из трех частей: нижнего усеченного конуса (нагре-

<sup>1</sup> По-видимому, это связано с тем, что под воздействием продолжительного кипения разрушаются фракции, придающие напитку его характерный вкус, который формируется, в зависимости от состава смеси, более чем из тысячи ароматов, большинство из которых летучи.

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. Дополнительная 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  $\Delta H$  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  $\Delta p = \rho g \Delta H$ :

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

Здесь  $w = Q/S$  есть так называемая скорость фильтрации, показывающая, какой объем жидкости протекает через единицу площади поверхности фильтра в единицу времени, коэффициент  $\eta$  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  $10^{-14} \text{ м}^2$ . 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 любителей кофе. Из-за чего же и как это может случиться?

Ясно, что прежде всего может за-



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 покрепче) 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, превратившись 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  $T_k = 373$  °С = 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).

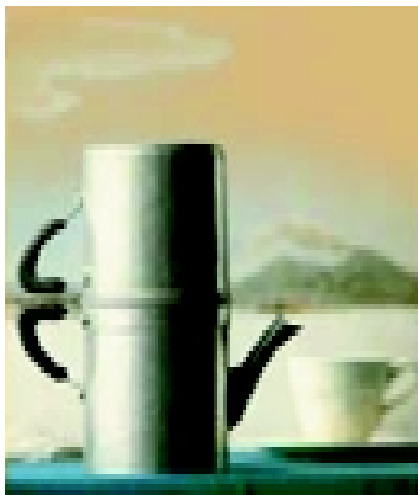
делать других бед. Так что присматривайте за клапаном, выбирайте кофе правильного помола, засыпайте его в фильтр без горки и, главное, не утрамбовывайте.

Кофе в мокке получается крепким и ароматным, без осадка, однако все же уступает по своим вкусовым качествам кофе «эспрессо», который подается в хорошем баре. Основной причиной этого, по-видимому, является сравнительно высокая температура кипятка, продавливаемого сквозь фильтр перегретым паром. Поэтому рецепт улучшения качества кофе при его приготовлении в мокке таков: ставьте кофеварку на очень слабый огонь. При этом процесс фильтрации будет идти медленнее, однако и пар в нижнем сосуде не будет слишком перегреваться.

Наверное, очень хороший кофе можно приготовить в мокке, находясь в высокогорном альпинистском приюте: там внешнее давление заметно ниже 1 атм, и, например, на высоте Эвереста вода кипит при 74 °С – так что перегрев воды в мокке как раз доведет температуру до оптимальных 90–95 °С.

### Старинная неаполитанская кофеварка «Napoletana»

Эта кофеварка напоминает мокку, однако вместо фильтрации избыточным давлением пара использует фильтрацию под влиянием силы тяжести. Она также состоит из двух сосудов, поставленных один на другой, и фильтра, заполненного кофе, между ними. Вода в нижнем цилиндре доводится до кипения, затем кофеварка снимается с огня и переворачивается. Происходит фильтрация под действием давления столба воды порядка нескольких сантиметров, так что  $\Delta p$  не превышает 0,01 атм. Процесс приготовления кофе идет здесь заметно медленнее, чем в мокке. Можно поставить эксперимент по приготовлению одного и того же количества кофе в обеих кофеварках и, основываясь на следующей из закона Дарси обратной пропорциональности времени приготовления кофе приложенному давлению, проверить нашу предыдущую оценку давления в нагревателе мокки. Однако на практике для «Napoletana» кофе выбирают более крупного помола, чем для мокки, иначе напиток будет готов лишь через полчаса и окажется холодным.



Знатоки говорят, что кофе из «Napoletana» получается вкуснее, чем из мокки: здесь нет пагубного воздействия на кофе перегретого кипятка.

Впрочем, высокий темп современной жизни не оставляет времени для философской беседы на террасе с видом на Везувий и прекрасный неаполитанский залив в приятном ожидании, когда наконец-то наберется чашечка благотворного напитка. Эта роскошь осталась на старых картинах из неаполитанской жизни и в творениях Эдуардо де Филиппо.

### «Эспрессо»

Не все неаполитанцы были терпеливы и в прошедшие времена. Говорят, что в прошлом веке один из тех жителей столицы королевства Двух Сицилий<sup>3</sup>, кто не мог спокойно ждать у «Napoletana», убедил своего приятеля, инженера из Милана, сконструировать принципиально новую кофеварку, приготавливающую индивидуальную порцию прекрасного ароматного густого напитка в течение полминуты.

Каждая чашка хорошего кофе является вместилищем секретов роста и сбора урожая кофейных зерен, приготовления смеси и ее прожарки, помола... За вершиной кофейного искусства – маленькой чашечкой итальянского «эспрессо» – стоит также и высокая технология. Аппарат для приготовления «эспрессо», который называют тоже эспрессо, гораздо больше и внушительнее своих типичных выше коллег. Обычно такие машины стоят в барах и ресторанах, однако для знатоков и любителей

кофе существуют и домашние версии этого аппарата. Фирма «La Pavoni», производящая такие кофеварки с 1905 года, – одна из старейших, и ее продукция известна во всем мире.

В эспрессо вода с температурой 90–94 °С продавливается под давлением 9–16 атм сквозь фильтр с кофейным порошком специального помола, еще более мелкого, чем для мокки. Весь процесс занимает 15–25 секунд, в результате чего изготавливается 1–2 порции кофе по 20–35 мл каждая – лично для вас и, может быть, для вашего собеседника. Процесс протекания жидкости сквозь фильтр с кофейным порошком описывается тем же законом Дарси, что и в мокке, однако разность давлений, прилагаемая к фильтру, здесь в десятки раз больше, а температура, наоборот, ниже 100 °С. Эти параметры подобраны специально таким образом, чтобы высокой температурой не разрушить неустойчивые фракции кофейного напитка. Сравнительно короткое время взаимодействия воды с порошком совместно с высоким давлением оставляют в порошке все лишнее и извлекают из него все лучшее: эмульсии кофейных масел формируют ту густоту напитка, которая не может быть достигнута никаким другим способом; его аромат сохраняется наличием пенки, которая не позволяет исчезнуть летучим компонентам. «Эспрессо», как это ни странно, содержит меньше кофеина – из-за краткости контакта воды с порошком (20–30 с против 4–5 мин) в фильтре и малости ее объема весь кофеин не успевает извлечься.

Первый образец эспрессо был выставлен в Париже в 1855 году. В современных стационарных аппаратах, составляющих оборудование баров и ресторанов, вода подается под необходимым давлением с помощью имеющегося в конструкции специального насоса. В классической машине для приготовления «эспрессо» горячая вода из цилиндра нагрева при поднятии ручки заполняет камеру над фильтром и затем продавливается сквозь фильтр вручную, опусканием ручки; высокое давление создается за счет динамического сопротивления фильтра с кофе и эффекта рычага, многократно увеличивающего усилие руки.

Интересно наблюдать за поведением кофейной струи, стекающей с

<sup>3</sup> Которой когда-то был Неаполь.

носика по мере того, как заполняется чашка. Сначала эта струя течет хорошо, затем слабеет и в некоторый момент переходит в капель. То же самое явление авторы наблюдали и в горах: солнце прогревало снег на крыше, и поток талой воды стекал по сосульке то струей, то капелью. Попробуем оценить тот критический объемный расход воды  $Q_k$ , при котором происходит смена режимов. Для простоты будем говорить о сосульке, хотя результаты окажутся применимыми и к кофеварке.

Пусть поток воды медленно стекает по сосульке. Понятно, что пока объемный расход воды очень мал, струи не получится. Действительно, на конце сосульки вода будет собираться в каплю, капля будет медленно расти, достигнет некоторого критического размера, сорвется... и процесс повторится. Поскольку мы договорились, что расход воды очень мал, то процесс можно считать почти статическим. В условиях равновесия отрыв капли происходит тогда, когда ее сила тяжести  $mg$  превышает силу поверхностного натяжения  $F_\sigma = 2\pi\sigma r$ , действующую по периметру вдоль перетяжки (ее радиус мы обозначили  $r$ ):

$$mg = 2\pi\sigma r.$$

Время «заполнения» такой капли, очевидно, равно

$$t_k = \frac{m}{\rho Q_k}.$$

Понятно, что сам процесс отрыва капли также занимает некоторое время. Капля под действием сил поверхностного натяжения и тяжести пребывает почти в состоянии равновесия. Но когда ее масса достигает критической величины и поверхностное натяжение уже не может компенсировать силу тяжести, перемычка рвется. Характерное время разрыва перемычки  $\tau$  можно получить из соображений теории размерностей: жидкость с вязкостью  $\eta$  должна быть перемещена на расстояние порядка  $r$  под действием сил поверхностного натяжения с коэффициентом  $\sigma$ . Запишем равенство:

$$\tau = r^\alpha \eta^\beta \sigma^\chi$$

и сравним размерности правой и левой сторон:

$$c = m^\alpha (\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}))^\beta (\text{кг}/\text{с}^2)^\chi.$$

Отсюда получаем

$$1 = -\beta - 2\chi, \quad 0 = \alpha - \beta,$$

$$0 = \beta + \chi,$$

что дает

$$\alpha = \beta = -\chi = 1,$$

или

$$\tau \sim \frac{\eta}{\sigma}.$$

Теперь понятно, что смена режимов капли и струи происходит при таком объемном расходе воды, когда очередная капля еще не успевает оторваться, как уже набегают новая, т.е. при

$$t_k \sim \tau, \quad \text{или} \quad \frac{m}{\rho Q_k} \sim \frac{\eta}{\sigma}.$$

Выражая массу капли из условия ее равновесия через силу поверхностного натяжения, находим окончательную красивую формулу:

$$Q_k \sim \frac{2\pi\sigma^2}{\eta\rho g}.$$

Впрочем, оперируя не с объемным расходом воды, а с расходом массы, можно было бы сразу получить эту формулу из анализа размерностей и замечания, что  $Q_k$  не должно зависеть от размера кончика сосульки (сосулька тает, и кончик «подстраивается»). В случае металлического носика кофеварки его размер в принципе может влиять на величину критического потока, но не сильно, так что найденная для сосульки оценка, вполне применима и для носика кофеварки.

### Растворимый кофе

Постоянная спешка современной жизни привела к появления растворимого кофе. Его приготавливают из настоящего кофе, который измельчают и выдерживают при высокой температуре и очень низком давлении. Вода сублимирует, а оставшийся порошок помещают в вакуумную упаковку, где он может храниться весьма долго, не теряя своих свойств. Перед употреблением он просто растворяется в горячей воде.

### Вариации на тему «эспрессо»

Имея кофеварку, которая готовит «эспрессо», и хорошую кофейную смесь, можно приготовить целый спектр кофейных напитков. Так, в



итальянском баре вы можете получить: *caffè ristretto* – «укороченный кофе», приготовленный с нормальным количеством кофе, но меньшим количеством воды; *caffè lungo* – «удлиненный кофе», приготовленный с нормальным количеством кофе, но большим количеством воды; *caffè macchiato* – то же «эспрессо», но с добавлением небольшого количества молока; *caffè corretto* – «эспрессо» с добавлением ликера, виски или водки. Особого разговора заслуживает «саруссипо»<sup>4</sup> – «эспрессо», налитое на дно чашки среднего размера и залитое сверху молоком, взбитым горячим паром до состояния воздушной пены. Хороший бармен может залить это молоко на кофе так, что на поверхности выступит написанная коричневым на белом фоне первая буква вашего имени. А можно просто присыпать белоснежную пену порошком какао или крошками шоколада.

Наконец, говорят, что в Неаполе в некоторых местах до сих пор подают *caffè prepagato*. Выглядит это так. Заходит хорошо одетый синьор со спутницей или с приятелем и заказывает: «Три кофе! Два нам и одно *caffè prepagato*». Через некоторое время в тот же бар заходит бродяга или просто бедняк и спрашивает, нет ли *caffè prepagato*. И бармен наливает ему бесплатно чашечку ароматного «эспрессо». Неаполь остается Неаполем...

<sup>4</sup> Свое название этот напиток получил за внешнее сходство с монахом-доминиканцем, носящим белую рясу с черным клобуком (клобук по-итальянски называется *sarussio*).