



Агарков Дмитрий Александрович
*Студент факультета общей и прикладной физики МФТИ,
участник команды «Физтех», выступающей
на Всеукраинском студенческом турнире физиков.*

Укрощённое молоко

На одном из очередных студенческих турниров физиков, прошедшем в г. Киеве, был сделан доклад о «поиске истины» с помощью простых опытов, которые каждый может повторить, причём многие – даже у себя дома. О проведённых при этом исследованиях различных способов предотвращения «убегания» молока автор доклада рассказывает в этой статье.

Выясняя факторы, при которых молоко не «убежит» из кастрюли, мы разделили исследованные нами способы его «удержания» на две группы: для использования в домашних условиях и в лабораторных. Прежде чем рассмотреть их, поясним основную причину «убегания» молока.

При нагревании на поверхности молока образуются плёнка и пена из полимеризирующихся молекул веществ, входящих в его состав. Начинает возникать плёнка при температуре 40–50 °С. Нагревание вызыва-

ет выход на поверхность пузырьков, наполненных воздухом и «молочными» парами, но плёнка задерживает их. В определённый момент под ней скапливается достаточно много пузырьков – они отрывают плёнку от стенок и поднимают её до краёв кастрюли. Именно в этот момент молоко «убегает». Чтобы не допустить этого, надо добиться «свободного» кипения молока, подобного кипению воды, когда пузырьки беспрепятственно выходят на поверхность жидкости.

«Домашние» способы

Самый очевидный и простой способ избежать «побега» (его чаще всего и используют в быту) – убирать с поверхности молока образующиеся плёнку и пену (рис. 1).

Более удобный способ – создать на дне кастрюли область интенсивного кипения, формирующую поток пузырьков и жидкости от дна к поверхности молока. Этот поток будет разрывать плёнку, когда она только



Рис. 1

начнёт образовываться, и молоко при кипении не «убежит». Создать такую область проще всего, положив на дно кастрюли шершавую проволоку или ложку, крышку, под которой находится воздух. Некоторое время назад промышленность выпускала «сторож для молока» (рис. 2). Он представлял собой диск с концентрическими вогнуто-выпуклыми канавками. Во время нагревания молока эти канавки образовывали потоки, разрывающие плёнку.



Рис. 2

Проверочный эксперимент.

Поскольку эти способы основаны на разрыве плёнки, мы проверили правильность нашего исходного представления о процессе кипения молока, определив критический параметр (радиус) пузырька, который может разорвать плёнку. Зафиксированное в экспериментах критическое положение пузырька под поверхностью плёнки изображено на рис. 3 (его подъёма выше этого положения мы не наблюдали).

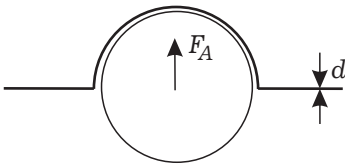


Рис. 3

В момент его разрыва сила Архимеда F_A становится равной силе

упругости, действующей на пузырёк со стороны плёнки (равной, в свою очередь, в этот момент предельной силе прочности плёнки): $F_A = F_{\text{упр}} = F_{\text{пр}}$. Следовательно,

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_M g = \sigma S = \sigma \cdot 2\pi R d,$$

где R – радиус пузырька, ρ_M – плотность молока (1030 кг/м^3), σ –

предел прочности плёнки $\left(\sigma \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right] \right)$,

d – её толщина ($\sim 0,1 \text{ мм}$), S – площадь кольцевидного сечения разрыва плёнки вокруг пузыря. Отсюда критический радиус

$$R = \sqrt{\frac{3d\sigma}{\rho_M g}}.$$

Чтобы вычислить его, надо знать предел прочности σ плёнки молока. Для определения σ мы провели эксперимент по отрыву петли от поверхности молока: помещали кусок прямой проволоки под поверхность плёнки и, вытягивая её из молока динамометром, фиксировали максимальную силу упругости $F_{\text{упр}}$ со стороны плёнки.



Рис. 4

Полученные результаты приведены в табл. 1.

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F , Н	0,021	0,019	0,020	0,023	0,025	0,018	0,020	0,021	0,22	0,023

Следовательно, среднее значение этой силы $\bar{F}_{\text{упр}} = 0,021$ Н. Погрешность измерения составляла $\Delta F_{\text{упр}} = 0,002$ Н. Значит, $F_{\text{упр}} = (0,021 \pm 0,002)$ Н. Сила F , при которой происходит отрыв проволоки, может быть определена и по формуле $F = 2Ld\sigma$, где $d = (1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-4}$ м – это диаметр проволоки, а $L = (0,10 \pm 0,01)$ м – это её длина (рис. 5).

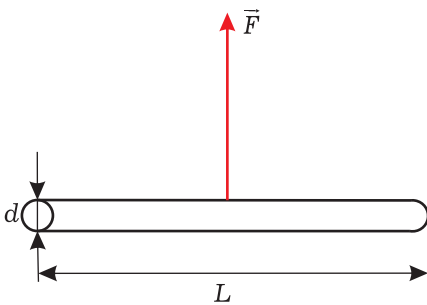


Рис. 5

Отсюда предел прочности молочной плёнки

$$\sigma = \frac{F}{2Ld}, \quad \sigma = (1050 \pm 305) \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Теперь можно получить значение критического радиуса; оно равно $R = (5,51 \pm 0,84) \cdot 10^{-3}$ м.

Плёнка разрывается в том случае, если радиус пузырьков, образующихся при кипении, больше по-

лученного значения критического радиуса. Отсюда следует, что способы укрощения молока должны обеспечивать образование больших пузырьков при кипении.

Критический радиус зависит от толщины плёнки, коэффициента поверхностного натяжения и плотности молока. Эти параметры зависят от сорта молока и не могут быть изменены, если мы работаем с конкретным сортом.

В эксперименте мы наблюдали пузырьки, разрывающие плёнку при $R = (4 \pm 1)$ мм. Измеряли мы их радиусы путём сравнения (пузырьки хорошо видны через растянутую плёнку) с радиусами пузырьков (на фотографии) известных размеров. Полученные нами близкие значения (расчётного и наблюдаемого) критических радиусов пузырьков подтвердили правильность нашего подхода к поиску способов «укрощения» молока и подсказали ещё один, совсем другой, способ предотвратить его «убегание» – не дать плёнке прикрепиться к стенкам кастрюли. Для этого их необходимо смазать маслом. В этом случае возле стенок происходит интенсивное «свободное» кипение, но ближе к центру кастрюли всё же образуется слой полимеризующихся молекул веществ, содержащихся в молоке, который, однако, не может подняться вверх.

Лабораторный способ

Поскольку прочная плёнка образуется на поверхности молока при температурах, близких к 60°C и выше, то если температура окажется

ся ниже этого значения, плёнка будет неустойчивой – пропускающей часть пузырьков – и не сможет подняться вверх. Таким образом удастся

избежать пенного «выплеска» молока. Из этого мы сделали вывод о возможности такого способа: добиться равномерного кипения молока, нагревая его до меньшей, чем обычно, температуры в условиях низкого давления. (Домохозяйка этот способ не устроит не только из-за сложности осуществления, но и потому, что не будет достигнута их

главная цель – кипячение при температуре $\sim 100^\circ\text{C}$, которое губит имеющиеся в молоке микроорганизмы.)

Экспериментально мы определили сначала ту температуру, при которой образовывалась плёнка на поверхности исследуемого молока. В пяти опытах мы получили данные, указанные в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	1	2	3	4	5
$t, ^\circ\text{C}$	59	57	49	52	54

Из неё следует $\bar{t} = 54,2^\circ\text{C}$, $t = (54 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Чтобы понизить температуру кипения до найденного значения t , давление над поверхностью молока должно быть уменьшено, что может быть сделано с помощью воздушного насоса: надо сосуд с молоком поместить под колокол насоса (рис. 6) и откачать воздух.



Рис. 6

Оценим давление, которое придётся создать под колоколом для закипания молока при температуре t . Используем для этого зависимость давления насыщенного пара жидкости от температуры:

$$p(T) = p_0 \exp\left(\frac{q}{RT_0} - \frac{q}{RT}\right).$$

Здесь p_0 – давление насыщенного пара при T_0 ($t_0 = 0^\circ\text{C}$), q – удельная теплота парообразования молока, R – универсальная газовая постоянная. В оценочных расчётах можно считать, что p_0 и q для молока совпадают с аналогичными значениями для воды.

Расчет по приведённой выше формуле показывает, что для того, чтобы молоко закипело при $\approx 50^\circ\text{C}$, давление должно быть равно $p = 13000$ Па. Эти сведения также можно получить из существующих таблиц плотности насыщенного пара.

Откачивая воздух из-под колокола насоса и измеряя давление манометром, мы подтвердили правильность своих расчётов и установили, что молоко закипает даже при комнатной температуре $t = 23^\circ\text{C}$, если $p = 3000$ Па.

Заключение. Проведённые опыты по проверке описанных здесь способов дали положительные результаты: нам всегда удавалось «укротить» молоко – добиться его кипения без «сбегания».