

# Спагетти и... физика

А.ВАРЛАМОВ

*Воспеваю, прославляю  
Раскрасавца макарона...  
Я вкушаю, обожаю,  
Трепещу, благоговею,  
Насыщаюсь, наслаждаюсь  
И от пищи сладко млею...*

Филиппо Сгруттендио  
(неаполитанский поэт и обжора, XVII в.).  
Похвальное слово макаронам

**Б**ЕЗУСЛОВНО, КАЖДЫЙ ЗНАЕТ, ЧТО ТАКОЕ СПАГЕТТИ, и наверняка многие читатели варили их сами. Однако задумывались ли вы о тех физических процессах, которые происходят во время варки и в результате которых на столе появляется правильно сваренная паста (так итальянцы называют любые макаронные изделия)? Например, что происходит внутри спагетти, пока они плавают в кипящей воде? Почему следует строго следить за соблюдением времени готовки, указанном на упаковке? Почему эти времена так сильно различаются для разных типов пасты? Как влияет форма продукта – классические спагетти разных диаметров, ригаттони, букатини и т.д. – на время варки? Зависит ли время приготовления пасты от того, готовите ли вы ее на морском побережье или высоко в горах? Почему сухая спагеттина при сгибании почти никогда не ломается на две части, а распадается как минимум на три куска? Почему спагетти в процессе варки не завязываются в узлы? Как выбирать тип пасты под имеющийся соус, чтобы она получилась вкусной и горячей?

Все эти вопросы в разное время привлекали внимание исследователей. Мы постараемся вникнуть в физику процесса варки спагетти и найти ответы на некоторые вопросы, которые могут возникнуть и у любознательного читателя.

## Немного из истории производства пасты

Вопреки общепринятому мнению, паста не была завезена в Европу венецианцем Марко Поло, совершившим путешествие в Китай во второй половине 13 века. В действительности ее история началась на побережье Средиземного моря намного раньше, практически с тех времен, когда человек, оставив кочевой образ жизни, начал выращивать зерно и употреблять его в пищу. Первые лепешки, печеные на раскаленных камнях, упоминаются еще в Библии и в других древних текстах. В первом тысячелетии до Рождества Христова греки уже производили пасту в форме тонких слоев и называли ее «laganon». Этот термин до древних римлян дошел в виде «laganum» и, по-

видимому, является предшественником современной лазаньи.

По мере становления Римской империи паста получает распространение в Западной Европе. Использование пасты как формы консервации зерновых продуктов возникает из-за необходимости перевозить с собой провиант при перемещении племен. Прародителем спагетти возможно стала сицилийская паста, выполненная в форме тончайших полосок и происходящая, в свою очередь, от арабской порезанной полосками лепешки. Ее начали производить в Палермо в начале второго тысячелетия. Основываясь на подробном завещании, заверенном генуэзским нотариусом, можно с уверенностью утверждать, что к 1280 году в Лигурии уже употреблялись макароны. Из истории итальянской литературы известно, что паста привлекала внимание многих писателей, а в «Декамероне» Джованни Баккаччо макароны становятся символом изысканного деликатеса.

Первые цеха производителей пасты со своими уставами возникают в Италии в 16 веке и получают политическое и общественное признание. В те времена макароны являются явством для богатых, особенно в регионах, где не хватает своего производства твердых сортов пшеницы, например в Неаполе. Изобретение механического пресса приводит к удешевлению производства пасты и снижению ее цены. В результате в 17 веке паста становится одним из основных продуктов питания всех социальных классов и широко распространяется по всем странам средиземноморского бассейна. А Неаполь становится центром производства и экспорта макаронных изделий. Здесь паста, заправленная томатным соусом с базиликом или посыпанная тертым сыром, продается на каждом углу. В северной Италии паста получает массовое распространение в конце 18 века, в большой степени благодаря открытию в Парме небольшой фабрики, которая впоследствии становится одним из столпов пищевой промышленности Италии.

Современные методы производства пасты основаны на использовании процессов экструзии и волочения. Экструзия – непрерывное выдавливание размягченного материала через отверстие определенного сече-

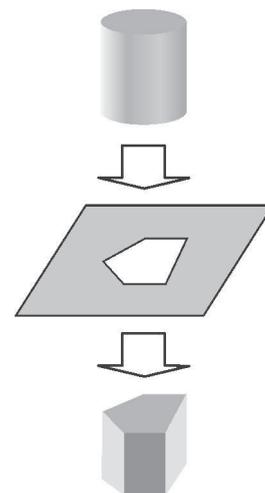


Рис.1. Иллюстрация процесса экструзии



Рис.2. Фильтра (волока) для изготовления спагетти

ния – была изобретена и впервые применена для изготовления длинномерных металлических изделий с заданным сечением (рис.1). Процесс экструзии основан на свойстве текучести материалов и осуществляется при их продавливании сквозь более жесткую форму посредством сжатия. Он может проводиться как в холодном, так и в горячем режиме. Волочение – это процесс, подобный экструзии. Единственное существенное различие заключается в том, что при волочении материал продавливается через форму, расположенную на выходе из сосуда, и, таким образом, является скорее процессом растяжения, чем сжатия. В металлообрабатывающей промышленности таким способом производятся цилиндры, трубы и проволока. Металлическая проволока при этом может быть доведена до диаметра 0,025 мм. Другие материалы, в обработке которых используются экструзия и волочение, это полимеры, керамика и... продукты питания (рис.2).

### О варке спагетти по-научному

Прежде всего давайте поймем, в чем заключается процесс варки пасты. Содержащиеся в муке молекулы крахмала сгруппированы в гранулы диаметром 10–30 мкм, которые, в свою очередь, окружены различными протеинами. В процессе приготовления пасты два из них, соприкасаясь с водой, объединяются и образуют непрерывную сетку – клейковину, упругую и плохо проницаемую для молекул воды. Эта сетка покрывает собой гранулы крахмала. Время варки непосредственно зависит от способности молекул крахмала, окруженных клейковиной, впитывать воду, которая при помещении пасты в кастрюлю начинает проникать сквозь клейковинную сетку и диффундировать к центру спагеттины. Уже при температуре около 70 °С молекулы крахмала начинают образовывать желеобразное соединение, которое задерживает проникновение воды. Приготовление спагетти должно быть завершено в тот момент, когда желеобразный крахмал в пасте уже впитал минимальное количество воды, необходимое для того, чтобы сделать ее достаточно мягкой.

Таким образом, одно из необходимых условий для приготовления пасты состоит в том, что температуру внутри спагетто следует увеличить до некоторой определенной величины, в случае пасты до 70 °С. Второе условие – внутрь изначального сухого спагетто должна продиффундировать вода. Оба эти условия должны быть выполнены за время процесса варки. Действительно, ни разогрев сухих спагетти в печи, ни длительное держание их в холодной воде не приведет к появлению на столе тарелки аппетитной пасты.

Если аккуратно записать уравнение теплопередачи и уравнение диффузии и воспользоваться безусловно знакомым вам методом размерностей, то получим, что время приготовления спагетти  $\tau_{\text{сп}}$  связано с диаметром спагетто  $D$  соотношением

$$\tau_{\text{сп}} = aD^2 + b.$$

Коэффициент  $a$  определяется физическими свойствами пасты – ее теплопроводностью и коэффициентом диффузии, в то время как коэффициент  $b$  характеризует... национальность едока. В самом деле, если первое слагаемое в формуле определяет время доставки воды и необходимого тепла к центру спагетто, то второе говорит нам, как долго центральная часть пребывает под воздействием этих факторов. Вот почему итальянцы, которые предпочитают есть пасту в степени готовности «на зубок» (с нашей точки зрения, несколько недоваренной), процесс желеобразования крахмала в пасте доводят до конца не по всему объему, а так, что в центре он остается относительно твердым. В результате, как мы увидим ниже, коэффициент  $b$  в этом случае оказывается отрицательным. В других странах любители спагетти считают, что паста должна быть хорошо разварена, поэтому время, которое они варят пасту, может существенно превышать указанное на упаковке итальянским производителем время.

Давайте теперь отправимся в супермаркет и купим всю необходимую для эксперимента гамму пасты цилиндрической формы: капеллини, спагеттини, спагетти, вермишель, букатини... Далее, прочитаем и занесем в таблицу рекомендованные времена варки (колонка «экспериментальное время варки»). Затем возьмем штангенциркуль и измерим соответствующие диаметры, занесем их также в таблицу (колонки «внешний/внутренний диаметр»).

Для нахождения численных значений коэффициентов  $a$  и  $b$  достаточно использовать данные из двух строк нашей таблицы и решить соответствующую систему двух простых уравнений. Выберем данные для спагеттини №3 и вермишели №8 и получим

$$a = \frac{t_2 - t_1}{D_2^2 - D_1^2} = 3,4 \text{ мин/мм}^2,$$

$$b = \frac{D_2^2 t_1 - D_1^2 t_2}{D_2^2 - D_1^2} = -2,3 \text{ мин}.$$

Паста, которую мы купили, – итальянская, поэтому и рекомендованные времена приготовления соответствуют итальянскому вкусу, т.е. пасте, приготовленной «на зубок». В результате коэффициент  $b$  оказывается отрицательным.

Таблица

Тип пасты	Внешний диаметр $D$ , мм	Внутренний диаметр $d$ , мм	Экспериментальное время варки $t$ , мин	Теоретическое время варки $\tau$ , мин
Капеллини №1	1,15		3	2,2
Спагеттини №3	1,45		5	5,0
Спагетти №5	1,75		8	8,1
Вермишель №7	1,90		11	10,0
Вермишель №8	2,10		13	13,0
Букатини	2,70	1,00	8	22,5?!

Имея на руках численные значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , мы можем проверить, как наша формула работает для различных типов пасты цилиндрической формы. Результаты наших вычислений приведены в последней колонке таблицы, и читатель может убедиться в прекрасном согласии между теорией и экспериментом во всех строках таблицы за исключением двух крайних: для капеллини №1 и букатини. Здесь мы сталкиваемся с типичной для теоретической физики ситуацией: предсказание некоторой теории имеет свои пределы применимости, зависящие от сделанных при построении этой теории упрощений.

Посмотрим, например, на последнюю строку таблицы: для букатини различие между теоретическим и экспериментальным временами оказывается вопиющим – 22,5 мин вместо 8 мин! Такое расхождение указывает на интересный факт: диапазон возможных толщин всей гаммы цельной цилиндрической пасты (капеллини, спагетти, вермишель) оказывается весьма узким, составляя всего лишь 1 мм. Действительно, вычисление времени приготовления букатини в приближении однородного цилиндра с диаметром 2,70 мм дает 22,5 мин – за это время внешняя часть такого толстого спагеттоне просто превратится в кашу. Выход из положения был найден эмпирически: в цилиндре вдоль его оси следует сделать дырку. В эту дырку при варке проникает горячая вода, и необходимость долгого ожидания, пока тепло через внешние стенки дойдет до центра, отпадает. Наличие такой дырки можно попробовать учесть в нашей формуле простым вычитанием внутреннего диаметра из внешнего, пренебрегая при этом эффектом потока тепла, идущего в объем сквозь внутреннюю стенку (подумайте, почему это возможно). Эта модификация немедленно приближает теоретический результат к действительности:

$$\tau = a(D - d)^2 + b \approx 7,5 \text{ мин.}$$

Тем не менее, следует иметь в виду, что дырка в пасте не должна быть менее 1 мм в диаметре, в противном случае вода не сможет в нее проникнуть из-за капиллярного давления  $p_{\text{кап}} = \sigma(100^\circ\text{C})/d \approx 50 \text{ Па}$ , что соответствует высоте столба воды в несколько сантиметров над варящейся пастой.

Отклонение теории от практики иного рода происходит для очень тонкой пасты. Причина этой ошибки очевидна: говоря о приготовлении пасты, мы выбрали параметр  $b$  отрицательным:  $b = -2,3 \text{ мин}$ . Формально это означает, что может существовать столь тонкая паста, что ее можно есть вообще без варки. Соответ-

ствующий критический диаметр находится из соотношения  $0 = aD_{\text{кр}}^2 + b$ , откуда

$$D_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{-b}{a}} \approx 0,82 \text{ мм.}$$

Как видно, реальный диаметр капеллини (1,15 мм) не слишком отличается от этой критической величины, поэтому недооценка времени приготовления капеллини в таблице является результатом упрощения нашей модели.

### Заузливание спагетти

Отваренные спагетти, перепутанные друг с другом, представляют собой сложный клубок, однако автор никогда не видел, чтобы спагетти заузливались сами собой. Понять, почему этого не происходит, помогут достижения нового направления статистической механики – статистики полимеров.

Оказывается, что вероятность самозаузливания длинной полимерной цепочки определяется выражением

$$w = 1 - \exp\left(-\frac{L}{\gamma l_{\text{хар}}}\right),$$

где  $L$  – полная длина цепочки,  $l_{\text{хар}}$  – характерная длина, на которой полимер может изменить свое направление на  $\pi/2$ , и, наконец,  $\gamma \approx 300$  – большой численный коэффициент, полученный в результате численного моделирования и в некоторых упрощенных теоретических моделях. Применяя эту формулу к спагетти, для которой  $l_{\text{хар}} \approx 2 - 3 \text{ см}$ , можно оценить длину  $L_{\text{мин}}$ , при которой вероятность самопроизвольного заузливания стала бы заметной, скажем  $w = 0,1$ :

$$L_{\text{мин}} = \gamma l_{\text{хар}} \ln 1,1 \approx 30 l_{\text{хар}} \approx 60 - 90 \text{ см.}$$

Стандартная длина спагетти равна 23 см, и этого оказывается недостаточно для образования узлов.

### Сочетание типа пасты и вязкости соуса

Правила хорошего тона предписывают начинать еду одновременно всем сидящим за столом. Однако за итальянским столом исключение делается для первого блюда – пасты. Ее начинают есть в тот момент, как только тарелка появляется на столе. Паста должна быть горячей! Впрочем, паста попадает на стол не прямо из кастрюли с кипящей водой – предварительно ее сбрасывают на дуршлаг и перемешивают с соусом.

Понятно, что этот процесс занимает некоторое время и может оказаться длительным. Тогда паста остынет, и удовольствие уже будет не то.

Для того чтобы понять, какое время требуется для перемешивания соуса и пасты, начнем с простой модели: пусть вязкая жидкость протекает сквозь цилиндр под действием силы тяжести (это образ макаронины, в которую втекает соус). Стационарный поток  $Q$  жидкости в трубе диаметром  $D$  при разности давлений на входе и выходе  $\Delta p$  определяется известной формулой Пуазейля

$$Q = \frac{\pi \rho \Delta p D^4}{128 l \eta},$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости,  $\rho$  – ее плотность, а  $l$  – длина трубы. С другой стороны, величина потока по определению есть масса жидкости, протекающей через сечение трубы за единицу времени:

$$Q = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \frac{\pi D^2 \Delta l}{4 \Delta t}.$$

Сравнивая эти два выражения для  $Q$  и приписывая разность давлений действию силы тяжести:  $\Delta p = \rho g l$ , находим

$$\frac{\Delta t}{\Delta l} = \frac{32 \eta}{\rho g D^2}.$$

Мы видим, что скорость, с которой вязкая жидкость заполняет трубу, пропорциональна комбинации  $\eta/D^2$ . Эта формула получена в модели течения жидкости в поле тяжести сквозь вертикально расположенную трубу, поэтому в ответ входит ускорение свободного падения  $g$ . Впрочем ясно, что природа ускорения несущественна: с тем же успехом место  $g$  в этой формуле займет и ускорение, получаемое пастой при ее перемешивании ложкой.

Мы рассмотрели течение жидкости внутри одной трубы. Однако понятно, что если плотно составить несколько труб рядом, то жидкость между трубами будет течь приблизительно с той же скоростью, что и внутри них. Таким образом, мы приходим к выводу, что характерное время перемешивания пасты

$$\tau_{\text{пер}} \sim \frac{\eta}{D^2},$$

т.е. чем больше вязкость соуса, тем большего поперечного размера пасту следует выбирать. Так, не удастся хорошо и быстро перемешать тончайшие капеллини с густым генуэзским песто – с ним сочетаются короткие и толстенькие трофи, а с огромных паккери жидкий томатный соус просто стечет на дно тарелки, поэтому лучше оставить в нем помидоры черри неразмельченными и обогатить соус кусочками цукини и креветками.

Полученная формула для  $\tau_{\text{пер}}$  помогает также понять эмпирические правила итальянской кухни. Обычно паста и соус готовятся одновременно – паста в кастрюле, а соус на сковороде. У хорошего повара они приходят к состоянию готовности почти одновременно. Сбросив пасту на дуршлаг и сцедив воду, он отправляет ее на сковороду, где и перемешивает пасту с соусом. Вязкость заметно падает с температурой, поэтому

время перемешивания пасты с соусом, кипящим на сковороде, будет существенно меньше, чем если бы соус достали из холодильника. Кроме того, паста не теряет тепло при теплообмене с соусом. И еще одна тонкость. Паста в кастрюле чуть-чуть не доваривается по сравнению с рекомендуемым на упаковке временем, а на сковороде, при перемешивании с соусом, она продолжает вариться и добирает недостающие минуты, чтобы достичь кондиции «на зубок».

### Как ломается спагетто

В начале статьи было упомянуто еще одно интересное свойство спагетти, связанное с его механическим разрушением. Возьмите спагеттину за концы и изогните ее в дугу. Представляется очевидным, что при дальнейшем изгибе рано или поздно она в районе середины разломается на две части. Оказывается, в этом случае интуиция нас подводит – обломков всегда три и более.

Такое необычное свойство спагетти привлекло внимание многих ученых, среди которых был и Ричард Фейнман. И только совсем недавно, в августе 2005 года, благодаря исследованию французских физиков Одули и Некрича появилось количественное объяснение этого явления, которое, возможно, найдет свое дальнейшее развитие в науке о сопротивлении материалов. Ученые исследовали поведение тонкого упругого стержня под воздействием деформации изгиба. Для этого они сначала воспользовались известным уравнением Кирхгофа, записав его для искривленного упругого стержня с двумя закрепленными концами. Затем они изучили, что произойдет с распределением напряжений в стержне при его разломе в произвольной точке. Решение оказалось возможно найти лишь численно, но и это позволило понять физику явления.

Допустим, что в результате приложенного механического напряжения изгиба в самом слабом месте спагеттины происходит первый излом. Казалось бы, после этого образовавшиеся части должны вернуться к своим положениям равновесия. Однако этот процесс происходит весьма сложным и неоднозначным образом. Сразу же после первого излома в обеих частях стержня возникают упругие волны изгиба, которые распространяются вдоль них. Эти волны приводят к возрастанию в определенных областях стержня локального напряжения изгиба по сравнению с уже имеющимся статическим изгибом, предшествующим первому излому. В результате в местах сгущения изгибного напряжения могут происходить дальнейшие изломы стержня. Конечно, упругие волны, порожденные первым изломом, затухают со временем, однако при определенном соотношении между длиной стержня и его упругими свойствами они могут привести к последующим разломам стержня. Интересно, что, проведя сложные расчеты, ученые убедились в правильности своих выводов с помощью замедленной съемки экспериментов со... спагетти.

Поэкспериментируйте и вы, пока варятся ваши макароны.