

## ЖИВАЯ НИТКА

А. В. БАЗИЛЕВСКИЙ, В. М. ЕНТОВ, А. Н. РОЖКОВ

*Институт проблем механики РАН, Москва*

## LIVING FILAMENT

A. V. BAZILEVSKY,  
V. M. ENTOV,  
A. N. ROZHKOV

*The results of the studies of polymeric fluids flow, which combine the properties of liquids (fluidity) with those of solids (elasticity), are presented. It is shown how this combination of properties manifests itself in forming and eventual thinning of liquid filaments under the action of capillary forces. New approaches to the study of polymeric fluids, namely, via monitoring of the filament thinning, and possible applications thereof, are discussed.*

*Изложены результаты исследований особенностей движения полимерных жидкостей, сочетающих в себе свойства жидкостей (текучесть) со свойствами эластичного тела (упругость). Показано, как это сочетание свойств проявляется в формировании и медленном утончении жидких нитей под действием капиллярных сил. Описаны новые подходы к исследованию свойств полимерных жидкостей по наблюдениям утончения таких нитей и возможные их приложения.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

Не страшно потерять  
Уменье удивлять.  
Страшнее потерять  
Уменье удивляться.  
*Александр Городницкий*

...I never stopped dawdling like an eight-year-old  
on a spring morning on his way to school.  
Anything can make me stop and look and wonder,  
and sometimes learn. I am a very happy man...

*Kurt Vonnegut, jr. "Cat's Cradle"*

Исследование особенностей движения полимерных жидкостей, сочетающих в себе привычные свойства жидкостей (текучесть) со свойствами эластичного тела (упругость), важно для многих приложений. Достаточно сказать, что не существует согласия между специалистами в вопросе о том, какие уравнения описывают такие жидкости.

Полимеры, гигантские молекулы, образующиеся в результате объединения обычных молекул или мономеров, обладают множеством замечательных свойств, понимание и использование которых составляют одну из важнейших глав в науке и технике XX века. Свойства эти порождаются химической или физической природой полимера, а замечательность их проявляется в простых механических явлениях, что и определяет растущую роль полимеров в нашей жизни. Резиновые шины и мячи, нейлоновые чулки и ткани, пленка, защищающая продукты, и кевларовые бронежилеты, пластиковые лыжи и каноэ, сочетающие прочность с легкостью и гибкостью, — все это продукты полимерной химии и промышленности, ценные прежде всего своими механическими свойствами. За внешними проявлениями необычных свойств твердых полимеров скрываются еще более удивительные свойства полимерных жидкостей, расплавов полимеров и их растворов в обычных (низкомолекулярных) жидкостях.

Если растворить в стакане воды чайную ложку соли или сахара, то это почти никак не скажется на способности воды течь. Важнейшие гидродинамические свойства воды, ее плотность и вязкость, изменяются

лишь незначительно при растворении низкомолекулярных веществ. Только тогда, когда количества сахара и воды в смеси будут близки, раствор сахара превратится в густой сахарный сироп. Его можно сделать еще гуще, выпарив часть воды. Такой загустевший сироп приобретает уже способность образовывать тонкие нити. Именно по ним опытная хозяйка определяет степень готовности варенья (иначе говоря, нужное для длительного хранения содержание сахара). Та же способность образовывать нити служит источником дохода продавцов “сахарной ваты” – комков быстро затвердевших тонких нитей сахарного расплава. Ничего особенного в этом нет: по пути от подвижной жидкости (воды) до твердого тела (сахара) водосахарные смеси проходят все стадии густоты или вязкости. Еще более очевиден такой переход для жидкого стекла. Именно не слишком жидкое и не слишком твердое стекло используют для формования изделий из стекла, и в частности тончайших оптических волокон – основы современной техники передачи информации и знаменитого Интернета.

Почему нельзя делать волокна из воды? Почему нельзя делать волокна из расплавленного железа или меди? (И потому для изготовления металлической проволоки приходится использовать медленный, трудоемкий и дорогой процесс волочения.) Почему одни жидкости обладают свойством “прядомости” (и что это такое), а другие нет? Ответ на эти вопросы был заложен сто с лишним лет назад в работах великого английского физика Уильяма Стретта (лорда Рэлея). Для того чтобы жидкая струйка превратилась в твердое волокно, она должна прожить достаточно долго, чтобы успеть затвердеть. Однако это не так просто.

Основным врагом тонкой нити являются капиллярные силы. Если удалось создать тонкую нить радиуса  $r$  и длины  $l$ , то площадь ее поверхности  $S = 2\pi rl$ , а поверхностная энергия составляет  $W = 2\pi r\alpha$ . Здесь  $\alpha$  – поверхностное натяжение или поверхностная энергия жидкости.

Если нить превратится в сферическую каплю того же объема  $V = \pi r^2 l$ , ее радиус составит  $r^* = [(3/4\pi)V]^{1/3}$ , площадь поверхности  $S = 4\pi[(3/4\pi)r^2 l]^{2/3}$ , а поверхностная энергия  $W^* = 4\pi\alpha[(3/4\pi)r^2 l]^{2/3}$ . При  $W^* < W$  или  $(9r/2l) < 1$  столбику энергетически выгодно превратиться в каплю. Длинные жидкие нити неустойчивы. Неустойчивость сама по себе еще не означает, что нельзя сформировать нить. Развитие неустойчивости (распад жидкой нити) может оказаться достаточно длительным, чтобы успеть спасти жидкую нить, скажем заморозив ее, превратив в твердое тело.

Решающим фактором является время распада нити. Оно определяется соотношением между капиллярными силами, стремящимися разрушить нить, и про-

тивдействующими им силами вязкости и инерции. Мерой инерции жидкости служит ее плотность  $\rho$ . Большинство жидкостей имеют плотность, близкую к плотности воды,  $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$  (плотность жидких металлов на порядок больше). Вязкость или внутреннее трение характеризует способность жидкости сопротивляться деформации, в отличие от плотности она меняется в очень широких пределах.

Количественную характеристику вязкости иллюстрирует следующий мысленный эксперимент. Поместим слой жидкости толщиной  $h$  между двумя параллельными пластинками и заставим верхнюю пластинку скользить относительно нижней со скоростью  $V$ . Жидкость прилипает к пластинкам и потому движется неоднородно. В увлекаемой жидкости возникает линейное поле скоростей (поперечный градиент скорости  $V/h$ ). Чтобы поддержать движение, к пластинке приходится прикладывать силу тем большую, чем больше вязкость жидкости. Сила сопротивления, испытываемая движущейся пластинкой, составит  $F = \mu SV/h$ , где  $S$  – площадь пластинки, а  $\mu$  – вязкость (коэффициент вязкости) жидкости. Это фундаментальное свойство было введено И. Ньютоном. Для обычных (ньютоновских) жидкостей коэффициент вязкости – термодинамическое свойство, зависящее только от давления и температуры. В соответствии с определением в Международной системе единиц вязкость измеряется в паскалях на секунду ( $\text{Па} \cdot \text{с}$ ) (сила на единицу площади, умноженная на время). Жидкость единичной вязкости создает силу трения в  $1 \text{ Н/м}^2$ , если разность скоростей пластинок  $1 \text{ м/с}$ , а расстояние между ними  $1 \text{ м}$ .

В отличие от плотности вязкость различных жидкостей изменяется в широких пределах. Вязкость воды и жидких металлов  $\approx 1 \text{ мПа} \cdot \text{с} = 0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; вязкость оливкового масла в 100, глицерина в 1000, а меда в  $10^4$ – $10^5$  раз больше. В процессе изготовления стекла его предварительно нагревают настолько, чтобы вязкость оказалась в диапазоне  $10^3$ – $10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

В соответствии с теорией, развитой Рэлеем и его последователями, время жизни тонкой жидкой нити радиуса  $r$  определяется поверхностным натяжением  $\alpha$ , плотностью  $\rho$  и вязкостью  $\mu$  жидкости. Эти величины образуют два характерных времени: инерционное  $\tau_{\text{ин}}$  и вязкое  $\tau_{\text{вязк}}$

$$\tau_{\text{ин}} = \left( \frac{\rho r^3}{\alpha} \right)^{1/2}, \quad \tau_{\text{вязк}} = \frac{6\mu r}{\alpha}.$$

Эти выражения получаются непосредственно из соображений размерности; численные коэффициенты подобраны так, чтобы время распада оказалось близким к большему из характерных времен. Положим  $r = 0,2 \text{ мм}$

и подставим данные для воды ( $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\alpha = 0,070 \text{ Н/м}$ ;  $\mu = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ). В результате получим

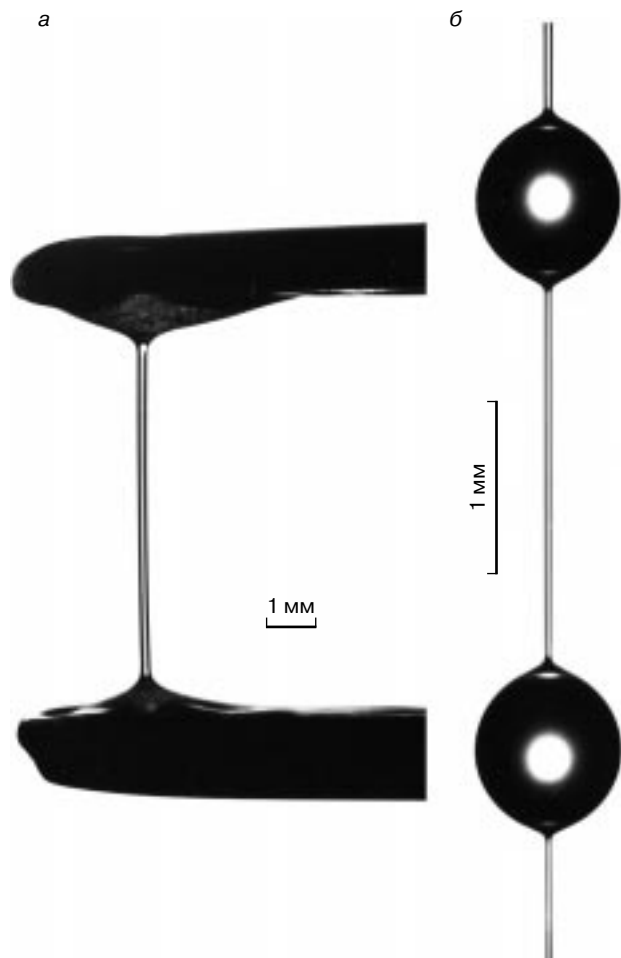
$$\tau_{\text{ин}} = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad \tau_{\text{вязк}} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Нечего удивляться, что водяных нитей не бывает: если такую нить и создать, она распадется быстрее, чем мы это успеем заметить. Достаточно толстый водяной столбик успевает прожить доли секунды в стружке, вытекающей из крана, но тонкая водяная нить практически ненаблюдаема. Тем удивительнее, что можно легко наблюдать тончайшую нить полимерного раствора, содержащего сотые доли процента полимера. Достаточно окунуть пальцы в полимерный раствор и развести их, и вы можете увидеть живую жидкую нить, которая постепенно, но за вполне измеримое время (десятичные доли секунды) становится тоньше и затем разрывается.

На рис. 1 приведена фотография нити раствора полиэтиленоксида (ПЭО) концентрации 0,1% между ножками пинцета. Диаметр этой нити 0,2 мм, время жизни  $\sim 1 \text{ с}$ , поверхностное натяжение раствора почти такое же, как у чистой воды. Таким образом, чтобы объяснить наблюдаемую живучесть нити, придется допустить, что она имеет эффективную вязкость  $\sim \mu_{\text{эф}} = 0,05 \cdot (1/6) \cdot 10^{-4} \approx 100 \text{ Па} \cdot \text{с}$  — в десять раз больше, чем вязкость меда, и в  $10^5$  раз больше вязкости воды! Прямые измерения показывают, что вязкость раствора лишь незначительно (в  $\sim 3$  раза) больше вязкости воды.

Еще более эффектно выглядит нить, которая образуется между двумя каплями на поздней стадии распада тонкой струйки разбавленного раствора полимера (рис. 1, б). Чтобы объяснить наблюдаемое время жизни нити, приходится приписать раствору вязкость  $\sim 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Чтобы разрешить этот явный парадокс, нужно мысленно заглянуть внутрь полимерного раствора. Полимеры, о которых идет речь, — длинноцепные линейные полимеры очень большой ( $\sim 4 \cdot 10^6 \text{ кг/моль}$ ) молекулярной массы. Это означает, что полимерная молекула (цепь) образована последовательным соединением огромного числа (в данном случае  $N \sim 10^5$ ) мономерных звеньев. Каждое звено имеет фиксированные размеры, определенные химическим строением (в данном случае длина звена  $l \sim 1 \text{ нм}$ ). Однако из-за свободного вращения звеньев относительно соединяющих их связей направления отдельных звеньев оказываются случайными. В результате конфигурация молекулы (конформация, как принято говорить) напоминает траекторию броуновской частицы, совершающей случайные блуждания с длиной шага  $l$  и числом шагов  $N$ . Поэтому конформация молекулы представляет собой запутанный клубок, радиус которого для нашего примера  $R \sim l^*(N^*)^{1/2} \sim 100 \text{ нм}$ . (На самом деле, звенья цепи, сегменты Куна,



**Рис. 1.** Утончающаяся нить разбавленного полимерного раствора между ножками пинцета (а) или двумя каплями в распадающейся струе (б)

состоят из нескольких мономеров, поэтому  $l$  нужно заменить на  $l^* = kl$ , а  $N$  — на  $N^* = N/k$ .)

Легко подсчитать, что внутри клубка концентрация собственно полимера  $c^* \sim 0,01\%$ , то есть очень мала. Однако полимер и растворитель (вода) так перепутаны, что полимерный раствор ведет себя примерно как суспензия твердых частиц радиусом  $R$ . (Это объясняет, почему малая добавка полимера сильно изменяет вязкость раствора, однако никак еще не объясняет наблюдаемое в опыте с нитью увеличение вязкости на пять (!) порядков.)

Чтобы понять это, нужно привлечь другое свойство полимерной молекулы. Гигантская гибкая цепь все еще остается молекулой и ведет себя так, как полагается молекуле. В частности, под действием теплового движения молекул растворителя она все время изменяет свою конформацию и в среднем стремится поддерживать

форму случайного (гауссова) клубка. Представим себе, что удалось схватить молекулу за концы и развести их на некоторое расстояние  $x$ . Стремление вернуться к свободной форме случайного клубка породит восстанавливающую силу  $F$ . В первом приближении эта сила оказывается пропорциональной расстоянию  $x$  и энергии теплового движения  $kT$  ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура):

$$F = -xkT.$$

Замечательно, что идеальная полимерная молекула ведет себя как идеальная пружина – возвращающая сила пропорциональна удлинению. Во многих отношениях эта пружина лучше, чем настоящая: ее можно растянуть не на 20% и не в два раза, а в  $\sim N^{1/2} \sim 100$  раз. Действительно, молекулу можно растягивать до тех пор, пока звенья полимерной цепи не будут вытянуты в одну линию.

Что произойдет, если растянутую молекулу отпустить и предоставить собственной судьбе? Под действием теплового движения она будет стремиться отрелаксировать – вернуться к форме гауссова клубка. Однако это не может произойти мгновенно. Дело в том, что полимерная молекула погружена в жидкость и, возвращаясь к своему равновесному состоянию, должна выпутываться из растворителя, преодолевая его вязкое сопротивление. Время, которое требуется для этого, имеет порядок

$$\theta \sim \frac{2\pi\mu R^3}{kT}.$$

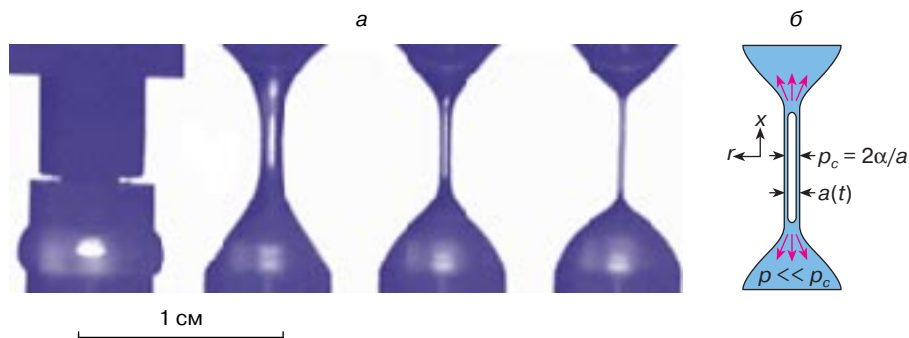
Это характерное время (время релаксации) играет основную роль в реакции полимерного раствора на внешнее механическое воздействие. Если элемент жидкости деформируется медленно с характерной скоростью формоизменения  $\gamma \ll 1/\theta$ , полимерные молекулы успевают выпутываться и сохраняют свою сферическую форму. При небольшой концентрации полимера его

вклад в напряжения в материале мал и поведение раствора практически не отличается от поведения растворителя. Если, однако, жидкость деформируется очень быстро, со скоростью  $\gamma \gg 1/\theta$ , то полимерные молекулы вынуждены следовать за увлекающим их растворителем. По мере растяжения элемента жидкости возрастает вклад полимерных пружинок в напряжения в жидкости. В результате быстро деформируемый полимерный раствор ведет себя как эластичное упругое тело, подобное податливой мягкой резине.

Естественно возникает гипотеза: не может ли упругость полимерной пружины объяснить сверхживучесть нитей полимерных растворов? Попробуем сделать некоторые оценки. Полимерная нитка (рис. 2) по боковой поверхности обжата капиллярным давлением, равным по формуле Лапласа  $p_c = \alpha/r$ , при этом она граничит с большими каплями жидкости, где капиллярное давление очень мало. Это равносильно тому, что нитка растягивается осевыми напряжениями  $p_c$  при отсутствии бокового обжатия. Пусть концентрация полимерных молекул  $n$  ( $1/\text{см}^3$ ), а степень их удлинения (по отношению к равновесному размеру клубка)  $\lambda$ . Тогда, суммируя вклады отдельных полимерных пружинок, найдем

$$\sigma = G\lambda^2 = \frac{\alpha}{r} = \frac{0,05 \text{ Н/м}}{0,0001 \text{ м}} = 500 \text{ Па}.$$

При  $G \sim nkT = (c/m)kT \sim 1$  Па это означает, что молекулы должны быть растянуты в  $\sim \lambda = 500^{1/2} \sim 22$  раз. Как мы уже видели, это никак не противоречит физике полимерных молекул. Таким образом, наблюдаемая нить полимерной жидкости – это форма равновесия капиллярных сил и упруго деформированных полимерных молекул, склеенных жидким растворителем. Если бы молекулы были прочно соединены между собой (сшиты) в сетку, иными словами, если бы мы имели дело с резиной, на этом дело бы и кончилось. Однако в полимерном растворе статическое равновесие невозможно.



**Рис. 2.** Эволюция жидкого мостика под действием капиллярных сил (а) и схема течения жидкости в мостике (б)

Растянутые молекулы стремятся сократиться, а капиллярные силы – сделать нить еще тоньше. Вопреки ожиданию взаимодействие этих двух тенденций приводит к тому, что нить постепенно утончается, а полимерные молекулы продолжают удлиняться, хотя и медленнее, чем жидкость, в которую они погружены. Несложная теория, основанная на изложенных выше соображениях, приводит к выводу, что радиус нити и удлинение макромолекул изменяются по показательному закону:

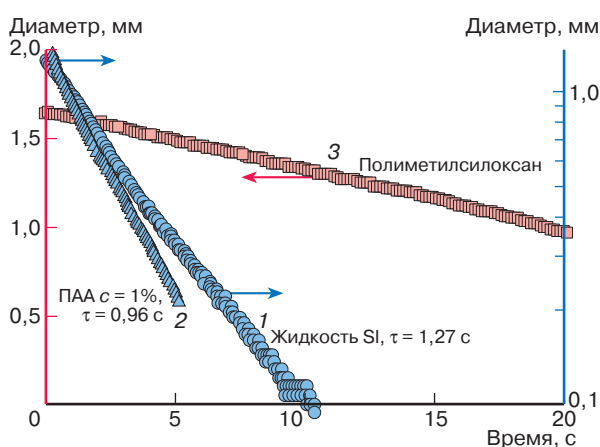
$$r = r_0 \exp\left(-\frac{t}{3\theta}\right), \quad \lambda = \lambda_0 \exp\frac{2t}{3\theta}.$$

Та же теория предсказывает, что нить достаточно вязкой ньютоновской (обычной вязкой) жидкости будет утончаться по линейному закону:

$$r = r_0 - \frac{\alpha t}{6\mu}.$$

Оба предсказания на удивление хорошо подтверждаются экспериментами для множества исследованных жидкостей (рис. 3). “На удивление” здесь относится, конечно, к полимерным растворам. Дело в том, что не было никаких оснований ожидать, что простейшая модель упруго-вязкой жидкости (так называемая модель Максвелла), основанная на суммировании свойств текучести и упругости, будет работать в области огромных деформаций полимерных молекул. (Это обстоятельство до сих пор ставит в тупик специалистов.)

Однако, поскольку предсказанный теорией экспоненциальный закон утончения нити подтверждается экспериментом, можно превратить наш “пальцевый



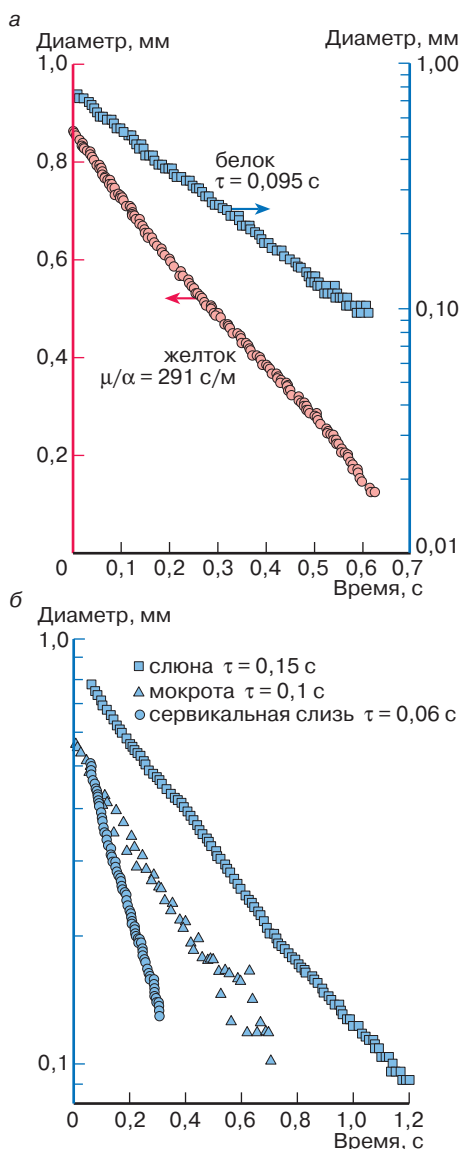
**Рис. 3.** Эволюция диаметра жидкой нити во времени. Обратите внимание на то, что для упругих жидкостей 1 и 2 график линейен в полулогарифмических координатах (правая шкала), а для вязкой жидкости 3 зависимость линейна в обычных координатах (левая шкала)

опыт” в простой прибор для измерения времени релаксации  $\theta$ . Для этого надо поместить каплю жидкости между двумя круглыми пластинками, затем быстро развести пластинки и наблюдать, как на жидком мостике развивается тонкая шейка, которая затем превращается в жидкую нить, медленно утончающуюся со временем. Комбинация современной видеотехники с компьютером позволяет записывать и автоматически анализировать изображение во всех деталях (см. рис. 2), однако существуют и более простые оптические и электрические методы отслеживания эволюции радиуса нити. В конечном счете получается компактная приставка к персональному компьютеру, которую можно использовать в самых различных приложениях.

Дело, однако, не только в простоте и дешевизне этого устройства по сравнению с другими реологическими приборами (то есть приборами для исследования свойств текучести жидкости). Этот новорожденный прибор использует микродозы жидкости (1 капля (!)) и позволяет повторять измерения с очень большой частотой, скажем несколько раз в минуту. Оба эти качества очень важны, когда имеешь дело с жидкостями, меняющими свои свойства во времени, например с полимеризующимися или образующими гель системами, используемыми в пищевой и нефтяной отраслях промышленности.

Особенно интересно то, что, научившись измерять механические свойства малого образца (капли), можно применить эти измерения к биологическим жидкостям (таким, как слюна, слизь и синовиальная жидкость – естественная смазка суставов). Рисунок 4 иллюстрирует некоторые из этих приложений. Отслеживая, как изменяется время релаксации бронхиальной слизи под действием муколитических (разжижающих слизь) препаратов, используемых для лечения некоторых легочных заболеваний, врач может проследить динамику и эффективность действия лекарства [5]. Уже эти предварительные опыты показывают широкие возможности нитяного реометра в физиологии и медицине, но основные результаты, несомненно, впереди, когда прибором всерьез заинтересуются медики.

Вернемся, однако, к нашему основному предмету – полимерной нити. По-видимому, нам удалось объяснить ее гиперустойчивость. Объясняется она тем, что сильно деформированные полимерные молекулы взяли на себя львиную долю нагрузки примерно так же, как стальные прутья арматуры берут на себя основную нагрузку в железобетоне. Более того, предсказываемый теорией экспоненциальный закон утончения нити хорошо согласуется с экспериментом. Нетрудно, однако, сообразить, что наши предсказания чересчур оптимистичны: экспоненциальное уменьшение радиуса означает,



**Рис. 4.** Кинетика утончения нитей некоторых биологических жидкостей. *а* – яичный белок и желток. Обратите внимание на то, что для упругого белка график линейен в полулогарифмических координатах (правая шкала), а для вязкого желтка зависимость линейна в обычных координатах (левая шкала); *б* – упругие жидкости: слюна, мокрота и (сервикальная) слизь человека

что нить не рвется никогда! Конечно, в эксперименте дело обстоит совершенно по-иному.

Нить полимерного раствора, конечно, рвется, и рвется достаточно скоро (хотя и в тысячи раз позднее, чем она порвалась бы при отсутствии полимера). Более того, наблюдается удивительная корреляция между временем релаксации жидкости  $\theta$  и временем разрыва

нити  $t_{\text{разр}}, t_{\text{разр}} \sim 5\theta$ , удивительная потому, что она указывает на согласованность двух физически различных явлений. Такая корреляция показывает, что на определенной стадии утончения схема идеальных молекулярных пружинок, погруженных в вязкую жидкость, перестает работать. Можно предложить два объяснения этого, в известной мере родственных.

Одно состоит в том, что нам удалось достичь предельной растяжимости молекул. Из естественной конформации статистический клубок молекула переводена в состояние вытянутой нити, и дальнейшему ее растяжению препятствуют жесткие химические связи. В результате полимерная жидкость перестает быть упругой и, как положено нити вязкой жидкости, нить рвется за конечное время.

Другое объяснение состоит в том, что сильно растянутые полимерные молекулы не выдерживают перенапряжения и разрываются. Оба этих объяснения имеют право на существование, и сейчас трудно сказать, какое из них (или оба сразу) справедливо. Важно, однако, что оба объяснения указывают, что на заключительной стадии распада полимерной нити полимерные молекулы находятся в состоянии предельной физической допустимой вытяжки вдоль оси нити. Такое предельно ориентированное состояние, если его удастся сохранить (например, при помощи быстрого охлаждения или испарения растворителя), будет обладать многими необычными свойствами. Исследование их представляется важным и многообещающим направлением.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом данного этапа исследований является демонстрация возможности достижения предельной однородной вытяжки полимерных молекул в устойчиво утончающейся нити жидкости. Последствия этого еще не изучены, однако в физике достижение предельных состояний всегда представляет наибольший интерес и в конечном счете ведет к новому знанию, а затем и новым технологиям.

Прямое приложение имеет и побочный результат – новый метод исследования сложных жидкостей в условиях растяжения. Наиболее важными представляются разнообразные приложения нитяного реометра в биомедицинских исследованиях, где малость исследуемой пробы жидкости имеет первостепенное значение.

Для полимерной гидродинамики как таковой важнее всего возможность исследования разбавленных растворов в условиях сильного одноосного растяжения. Уже на данном этапе многие результаты оказываются неожиданными и заставляют думать о пересмотре и необходимости уточнения основ теории – реологических определяющих соотношений.

Наконец, сочетание эксперимента с компьютерным анализом распада полимерных струй и нитей, сильно продвинутое в последнее время, делает эксперименты более информативными, а предсказания теории — приложимыми к важным техническим задачам, таким, как диспергирование и распыление жидкостей, струйная печать и высокоскоростное формование волокон.

Описанные выше исследования на разных стадиях были поддержаны Международным научным фондом (Фонд Сороса) (проекты М69000 и М69300), INTAS (проект 93-0279) и Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 93-013-17689 и 99-01-00474). Авторы признательны А.В. Карпову и В.Н. Калашникову (ИПМ РАН), А.Л. Ярину (Технион, Хайфа, Израиль) и Дж. Хинчу (Кембриджский университет, Кембридж, Великобритания) за сотрудничество и плодотворное обсуждение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Трилор Л.* Введение в физику полимеров. М.: Мир, 1985.
2. *Базилевский А.В., Воронков С.И., Ентов В.М., Рожков А.Н.* Ориентационные эффекты при распаде струй и нитей разбавленных полимерных растворов // Докл. АН СССР. 1981. Т. 237, № 4. С. 336–339.
3. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Лернер М.М., Рожков А.Н.* Распад нитей полимерных растворов // Высокомолекуляр. соединения. А. 1997. Т. 39, № 3. С. 474–482.

4. *Базилевский А.В., Ентов В.М., Рожков А.Н.* Распад мостика жидкости Олдройда — метод реологического тестирования полимерных растворов // Там же. 2001. Т. 43.

5. *Базилевский А.В., Рожков А.Н., Фаустова М.Е.* Реологический контроль муколитической терапии у больных неспецифическими заболеваниями легких // Пульмонология. 1992. № 4. С. 17–20.

*Рецензент статьи А.П. Маркеев*

\* \* \*

Александр Викторович Базилевский, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем механики РАН. Специалист в области гидродинамики неньютоновских жидкостей, реологии. Автор более 40 публикаций.

Владимир Мордухович Ентов, профессор, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем механики РАН, профессор РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, действительный член Российской академии естественных наук. Специалист в области прикладной математики, механики сплошных сред и прикладной гидродинамики. Автор 12 книг и более 250 статей.

Алексей Николаевич Рожков, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией прикладной механики сплошных сред Института проблем механики РАН. Специалист в области реологии, механики сплошных сред, гидродинамики струйных и пленочных течений. Автор более 50 публикаций.