

03

## К вопросу неравномерности капиллярного течения

© В.И. Волков, Д.Ю. Козлов, Е.Р. Кирколуп

Алтайский государственный медицинский университет, Барнаул  
E-mail: volkov@agmu.ru, dyk@agmu.ru

Поступило в Редакцию 3 апреля 2007 г.

Обнаружено, что капиллярное поднятие жидкости происходит пульсирующим образом, хотя обычно предполагается, что заполнение капилляра происходит с монотонно меняющейся скоростью. Оценены значения возникающего касательного напряжения сдвига для этилового спирта и дистиллированной воды.

PACS: 47.85.Dh.

Представленная работа относится к разделу капиллярной гидродинамики и может быть интересна специалистам, занимающимся как пленочными течениями, так и прониканием жидкости в мелкопористую среду. Обычно предполагается, что процесс заполнения капилляра жидкостью в поле тяжести происходит непрерывно с монотонно меняющейся скоростью до тех пор, пока гидростатическое давление не сравнивается с давлением Лапласа. При этом в начале процесса заполнения скорость движения максимальная, а затем происходит постепенное уменьшение скорости до нуля [1].

Однако при детальном исследовании динамики затекания жидкости в вертикальный стеклянный капилляр было обнаружено, что заполнение капилляра происходит далеко не монотонным образом. Так, во время заполнения капилляра спиртом, водой или трансформаторным маслом скорость движения мениска жидкости несколько раз то увеличивалась, то уменьшалась. Причем по мере заполнения капилляра период и величина этих скачкообразных изменений быстро уменьшились до нуля. Это можно было наблюдать и визуально, но особенно отчетливо неравномерность движения выявилась с помощью видеосъемки, т.е. на начальном этапе заполнения капилляра столбик жидкости, срываясь с места, подскакивал на некоторую высоту, и таких скачков было несколько за время капиллярного поднятия. Возможно, эти скачкообразные

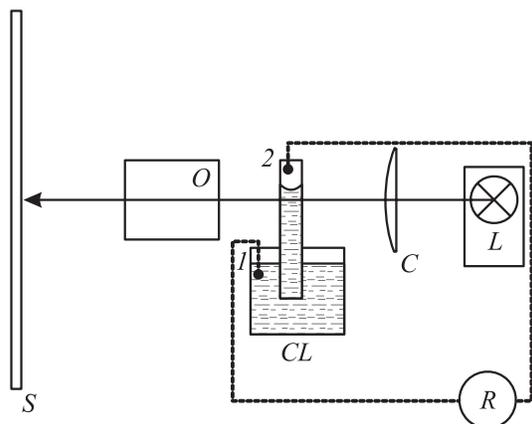


Схема экспериментальной установки:  $L$  — лампа;  $C$  — линза-конденсатор;  $CL$  — кювета с жидкостью и исследуемый капилляр;  $1$  и  $2$  — точки в жидкости и на стенке капилляра, между которыми измеряет сопротивление омметр  $R$ ;  $O$  — увеличивающий объектив;  $S$  — экран, на котором строится увеличенное теневое изображение.

изменения скорости происходили вплоть до максимального подъема мениска. Однако следует отметить, что по мере подъема в капилляре на фоне уменьшающейся скорости всей массы жидкости происходило уменьшение амплитуды изменения скорости, что не позволило отследить эти скачкообразные изменения для всего периода подъема жидкости в капилляре. Амплитуда и количество пульсаций по мере подъема мениска жидкости менялись, и максимальная высота поднятия жидкости также могла отличаться в отдельных экспериментах. Вероятно, причина этого обусловлена гистерезисом смачивания [2]. Отметим, что в экспериментах с капиллярами, расположенными под различными углами к горизонту, движение также имело скачкообразный характер.

В представленных экспериментах использовались стеклянные цилиндрические капилляры диаметрами от  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $10^{-3}$  и капиллярная щель, образованная двумя близко расположенными параллельными стеклянными пластинами, расстояние между которыми можно было варьировать при помощи микровинта. Визуализация процесса капиллярного заполнения производилась с использованием оптической системы (см. рисунок), состоящей из лампы от видеопроектора ( $L$ ), линз-

конденсаторов ( $C$ ), фокусирующих световой пучок на капилляр ( $CL$ ), расположенного за ним объектива ( $O$ ) и экрана ( $S$ ), на который проецировалось теневое изображение. Оптическая система увеличивала капилляр в 35 раз. Для записи капиллярного движения жидкости производилась цифровая видеосъемка с разрешением  $1024 \times 768$  пикселей и частотой 15 кадров в секунду. Затем происходила обработка видеофайла на компьютере для извлечения экспериментальных данных. Видеосъемка производилась многократно, и в каждой из серий был обнаружен эффект скачкообразного движения мениска жидкости.

Одно из возможных объяснений обнаруженного эффекта неравномерности капиллярного движения может заключаться в следующем. Как только жидкость соприкасается с твердой вертикальной стенкой, смачиваемой жидкостью, на ней образуется тонкий адгезионный слой жидкости. При этом поверхность жидкости натягивается подобно тетиве лука, и когда сила, обусловленная поверхностным натяжением, сравнивается с силой начального напряжения сдвига в жидкости, происходит срыв основной массы относительно жидкостной пленки вдоль стенки, что фиксируется в виде скачка столбика жидкости.

Другими словами, по мере капиллярного заполнения вдоль стенки капилляра скользит вверх тонкая пленка жидкости, при этом значительно опережая мениск. А так как пленка тонкая, то она достаточно быстро испаряется, поэтому влияние ее на процесс заполнения капилляра будет тем меньше, чем меньше скорость движения жидкости. Таким образом, эффект неравномерности капиллярного заполнения будет менее выражен в конце капиллярного движения при малой скорости жидкости, особенно для вязких жидкостей, скорость капиллярного заполнения для которых невелика.

Для обнаружения адгезионной пленки жидкости — „предвестника“ первого скачка столбика жидкости, измерялось электрическое сопротивление между жидкостью в кювете и стенкой капилляра, на которую крепился электрод из тонкой медной проволоки (точки 1 и 2 на рисунке). Было обнаружено, что после добавления жидкости в кювету сопротивление в цепи менялось в течение нескольких секунд, а затем восстанавливалось первоначальное значение. При этом на теневой картинке с большим увеличением удалось обнаружить, что изменение сопротивления возникало на значительном удалении мениска от электрического контакта на стенке капилляра. Это можно интерпретировать как появление „предвестника“, а затем, поскольку капиллярное подня-

тие не продолжалось, его испарение. Так, в экспериментах с 96%-м этиловым спиртом мениск в среднем отстоял от электрического контакта (точка 2 на рисунке) на  $0.01 \pm 0.002$  м. (Отметим, что в одном эксперименте „предвестник“ наблюдался значительно большей длины  $\sim 0.021$  м). Причина такого разброса пока не совсем ясна, возможно, это связано с гистерезисом смачивания. При капиллярном поднятии дистиллированной воды также был обнаружен „предвестник“, и его длина составила  $0.026 \pm 0.002$  м. В экспериментах с водой, в отличие от спирта, не было обнаружено случайных выбросов, существенно превышающих ошибку измерений.

Попробуем оценить напряжение начального сдвига по экспериментально определенной величине „предвестника“. Запишем уравнение, связывающее силы поверхностного натяжения и напряжения начального сдвига перед первым скачком мениска жидкости:

$$2\pi R\sigma = 2\pi RH\tau + \rho gV, \quad (1)$$

где  $2\pi R$  — длина границы трехфазного контакта капилляра радиусом  $R$ ;  $\tau$  — начальное напряжение сдвига жидкости;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $H$  — длина „предвестника“;  $\rho gV$  — вес столба жидкости, образующегося за счет капиллярного поднятия (в начале капиллярного поднятия этим весом можно пренебречь).

Тогда из уравнения (1) получим:

$$\tau = \frac{\sigma}{H}. \quad (2)$$

Подставив табличные значения  $\sigma$  и экспериментальные данные измерений длины „предвестника“  $H$ , получим соответствующие значения для начального напряжения сдвига  $\tau$ . Так, для воды эти значения составили  $\tau = 2.81$  N/m<sup>2</sup>, а для спирта  $\tau = 2.2$  N/m<sup>2</sup>. Для сравнения используем экспериментальные результаты двух работ, в которых определялось начальное напряжение сдвига для жидкостей. Результаты этих исследований дают на порядок отличающиеся значения, например, для воды:  $\tau = 0.11$  N/m<sup>2</sup> [3] и  $\tau = 0.01$  N/m<sup>2</sup> [4]. Но если проанализировать экспериментальные методики, использованные в этих работах, то можно заметить следующее принципиальное отличие. Так в [3] использовалась пьезоэлектрическая пластина и измерялось изменение резонансной частоты ее колебаний, а в [4] измерялась величина начального усилия

для приведения жидкости в движение. Следовательно, фактически в этих двух работах измерялись две несколько отличающиеся характеристики. По всей видимости, в работе [3] определялось напряжение сдвига для более тонкой пленки жидкости, прилегающей к твердой поверхности, а в работе [4] фактически определялся начальный сдвиг между слоями самой жидкости. Логично предположить, что чем тоньше адгезионная пленка жидкости, тем сложнее сдвинуть слои жидкости друг относительно друга [5]. В конечном итоге сила адгезии должна приблизить свойства тонкой пленки к упругим характеристикам сдвига твердого тела. Возможно, этим объясняется повышенное значение в предлагаемой работе по сравнению с экспериментами [3] и [4].

Итак, в заключение отметим, что в работе обнаружен скачкообразный характер капиллярного движения жидкости и предложено качественное описание этого явления за счет наличия „предвестника“ — тонкой жидкостной пленки пренебрежимо малой массы, быстро скользящей вдоль стенки и тянущей за собой столбик жидкости в капилляре.

## Список литературы

- [1] *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 538 с.
- [2] *Сумм Б.Д.* Гистерезис смачивания // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 7. С. 98–102.
- [3] *Базарон У.Б., Булгадаев А.В., Дерягин Б.В.* // ЖТФ. 1966. Т. 51. В. 4(10).
- [4] *Волков В.И., Кадышева С.С.* // Вестник Уральской медицинской академической науки. Екатеринбург. 2005. № 1. С. 46–48.
- [5] *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М.* Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с.