

# ТЮФ-2013:

## «МЕДОВЫЕ КОЛЬЦА»

Когда водяная струя вертикально падает на плоскую горизонтальную поверхность, она растекается по ней равномерно во все стороны. Совсем иная картина наблюдается, если воду заменить на достаточно вязкую жидкость, такую как мед, глицерин, шампунь или минеральное масло. Такая струя из-за высокой вязкости жидкости не успевает растечься, теряет устойчивость и начинает закручиваться в спираль. Это явление было предложено исследовать участникам Международного турнира юных физиков IYPT-2013 в задаче «Медовые кольца»

Вертикальная струя силиконового масла, падающая на горизонтальную поверхность, закручивается в кольцевые спирали. Высота падения (сверху вниз) составляет 2, 8 и 15 см

*Ключевые слова:* международный ТЮФ, физический эксперимент, вязкая жидкость, закручивание струи  
*Key words:* IYPT, experimental physics, viscous liquid, coiling jet

Исследователи, ранее изучавшие поведение струи вязкой жидкости при падении ее на горизонтальную поверхность, использовали силиконовое масло, инвертный сахарный сироп или полибутен (Mahadevan *et al.*, 2000; Ribe *et al.*, 2006). Во всех этих случаях вязкость жидкости была оочень высока: примерно в  $10^5$  раз больше вязкости воды. В зависимости от условий наблюдалось несколько режимов образования колец: «вязкий», «гравитационный» и «инерционный».

Наши основные эксперименты проводились с силиконовым маслом ПМС-10000, вязкость которого лишь в  $10^4$  раз больше вязкости воды. С десятикратным уменьшением вязкости связано важное различие в полученных нами результатах: оказалось, что в во всем доступном для наблюдений интервале скоростей реализуется только один режим образования колец, который заметно отличается от всех вышеперечисленных.

### Первый этап – эксперимент

Наша экспериментальная установка представляла собой установленный на кронштейне открытый сверху сосуд, в который снизу была вставлена трубка с внутренним диаметром 4,5 мм. Вытекающая из сосуда вертикальная струя силиконового масла падала в нижнюю кювету, заполненную этой же жидкостью. Образующиеся при этом кольца снимали скоростной видеокамерой.



ТУМАНОВ Владислав Владимирович – студент второго курса физического факультета Новосибирского государственного университета. На международный турнир юных физиков попал, будучи учащимся Лицея №130 имени Академика М. А. Лаврентьева (Новосибирск)



ЩЕТНИКОВ Андрей Иванович – заместитель директора по научно-методической работе в ООО «Фарадей» (Новосибирск). Автор и соавтор 80 научных работ. Руководитель команды юных физиков Школы Пифагора (Новосибирск)

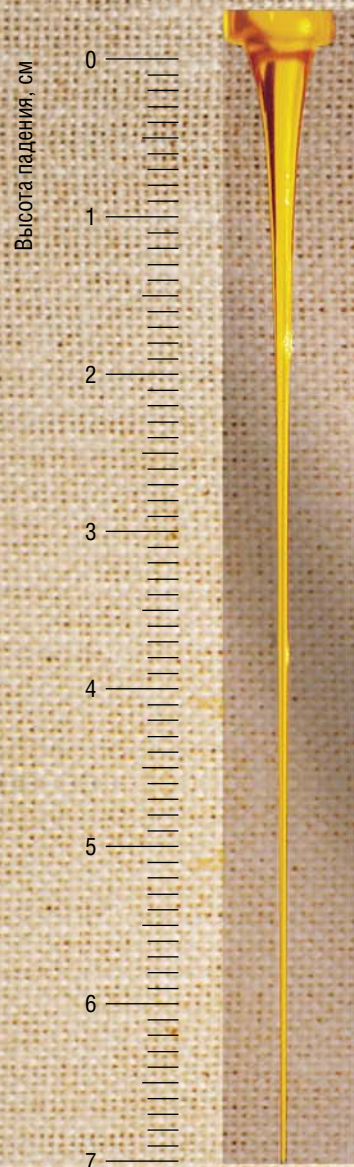
Высоту, на которой находился нижний обрез трубки над поверхностью масла в кювете, меняли в пределах от 0 до 20 см. Объемный расход жидкости во всех проведенных испытаниях составлял всего  $0,06 \text{ см}^3/\text{с}$ , так что за время каждого испытания уровень жидкости в кювете и в сосуде оставался практически постоянным.

Определяющим параметром задачи является скорость, с которой струя налетает на поверхность. Чтобы узнать эту скорость, мы фотографировали струю, падающую с разной высоты, и измеряли ее диаметр. Затем, зная объемный расход жидкости  $Q$  и радиус струи  $a$ , рассчитали скорость  $u$  падающей струи по формуле  $u = Q/\pi a^2$  и проанализировали, как этот параметр меняется с высотой.

Эксперименты показали, что в интересующих нас пределах скорость струи растет пропорционально расстоянию от отверстия трубки. Это правило не работает на совсем маленьких (миллиметровых) расстояниях, но на этих высотах кольца на струе и не образуются. Линейная зависимость не будет работать и на больших расстояниях: ведь вязкая жидкость не может падать быстрее невязкой, а скорость падения невязкой жидкости растет с высотой по известному «корневому» закону свободного падения.

Чем больше скорость падения вязкой жидкости, тем с большей частотой закручиваются кольца и тем меньшие размеры они имеют. Оказалось, что полученную зависимость с хорошей степенью точности можно считать степенной с показателем степени 2,14. Теперь рискнем предположить, что в показателе степени должно стоять не дробное число, а целая двойка, и попробуем построить теоретическую модель, дающую такой скейлинг (степенную взаимозависимость двух величин).

© В. В. Туманов, А. И. Щетников, 2014



Вам нужно измерить скорость падения струи жидкости, имея в наличии только фотоаппарат и линейку с делениями? Это очень просто: когда течение установилось, т.е. перестало меняться со временем, объемный расход несжимаемой жидкости  $Q$  на любой высоте будет постоянным. Поперечное сечение струи представляет собой круг, площадь которого  $S$  пропорциональна квадрату диаметра (толщины) струи. Линейная скорость течения рассчитывается по уравнению  $u = Q/S$

## Второй этап – теоретическая модель

Основная идея предложенной нами теоретической модели состоит в предположении, что вязкие силы, действующие в закручивающемся кольце, полностью гасят импульс струи до того, как она соприкоснется с подложкой.

Изложим ход наших рассуждений. Пусть струя вязкой жидкости на полете к поверхности имеет радиус  $a$  и скорость  $u$ . Тогда объемный расход жидкости составит  $Q = Su = \pi a^2 u$ . Далее введем еще два параметра: радиус  $R$  и угловую частоту  $\omega$  закручивающихся колец, которая будет равна  $\omega = u/R$ .

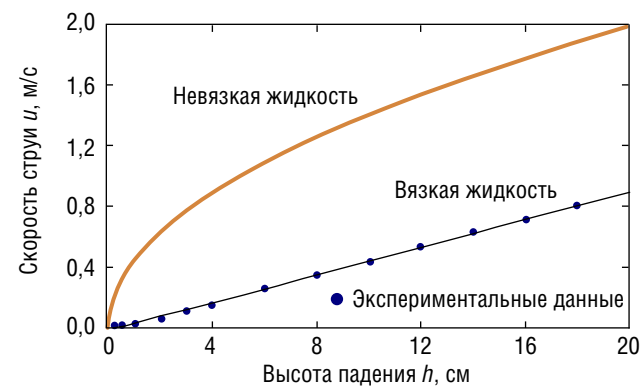
Теперь запишем второй закон Ньютона для той части струи, которая укладывается в кольцо. «Вязкую силу»  $F$ , действующую на нижнюю часть струи со стороны подложки и направленную вертикально вверх, оценим как произведение динамической вязкости  $\eta$ , сечения струи  $S$  и градиента линейной скорости укладки кольца  $u/R = \omega$ :

$$F \sim \eta a^2 u / R \sim \eta Q / R \sim \eta Q \omega / u.$$

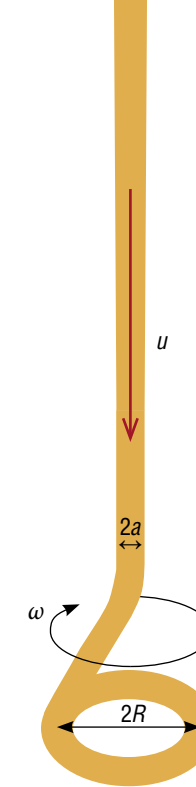
Приравняв эту силу к изменению импульса  $\rho Q u$  ( $\rho$  – плотность жидкости), получаем простое соотношение, связывающее частоту образования колец и скорость струи:

$$\omega \sim \rho u^2 / \eta.$$

Таким образом, в рамках наших теоретических предположений об укладке струи частота образования колец оказывается пропорциональна квадрату скорости струи. Эти теоретические выкладки хорошо согласуются с результатами нашего эксперимента.

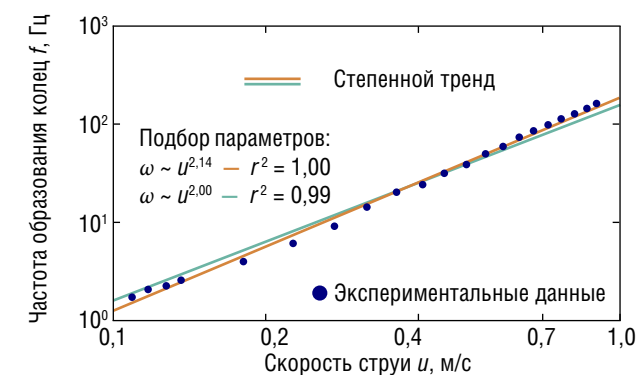


Как известно, в условиях свободного падения (т.е. в случае невязкой жидкости) скорость падения пропорциональна квадратному корню пройденного пути:  $u = \sqrt{2gh}$ . Вязкая жидкость не может падать свободно, поэтому зависимость скорости струи от высоты падения становится качественно другой – в нашем случае практически линейной



Простая теоретическая модель взаимодействия струи с плоской горизонтальной поверхностью, построенная при решении задачи ИУРТ-2013 «Медовые кольца», основана на предположении, что импульс струи при укладке в кольцо гасится силой вязкого трения, направленной вертикально.

Основными параметрами модели являются: радиус  $a$  и скорость  $u$  струи, радиус  $R$  и угловая частота  $\omega$  образования колец, связанная с круговой частотой  $f$  соотношением  $\omega = 2\pi f$



Зависимость частоты образования колец от скорости струи  $f(u)$  можно считать квадратичной с большой степенью достоверности. График представлен в логарифмических координатах

Почему же при обработке экспериментальных данных мы получили столь странный дробный показатель степени? Ведь если при подборе параметров функциональной взаимосвязи экспериментальных величин принудительно задать целочисленное значение показателя степени, равное двум, то коэффициент корреляции между этими величинами останется очень близким к единице. Из этого следует, что квадратичная зависимость также является достаточно хорошим приближением.

Причина отклонения экспериментальной зависимости от квадратичного закона может быть связана, например, с погрешностями измерения малых значений толщины струи.

Кроме того, по мере укладки очередного кольца нижние под ним отчасти успевают расплываться, так что наложение кольца происходит, по сути, на наклонную поверхность. И сила, действующая при этом на укладываемую часть струи, направлена не строго вертикально.

Наконец, свой вклад может внести и влияние поверхностного натяжения жидкости. Возможность проверить эти и другие предположения предоставляются нашему любознательному читателю.

### Литература

Barnes G., Woodcock R. Liquid rope-coil effect // *Am. J. Phys.* 1958. V. 26. P. 206–210.

Mahadevan L., Ryu W.S., Samuel A.D.T. Fluid rope trick investigated // *Nature*. 1998. V. 392. P. 140. Correction: 2000. V. 403. P. 502.

Ribe N.M. Coiling of viscous jets // *Proc. R. Soc. Lond. A*. 2004. V. 460. P. 3223–3239.

Ribe N.M., Huppert H.E., Hallworth M.A., et al. Multiple coexisting states of liquid rope coiling. // *J. Fluid Mech.* 2006. V. 555. P. 275–297.