

## Особенности вязковолновых течений вблизи колеблющихся твердых границ с различными адгезионными свойствами

Б.Е. Грачев\*

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
физический факультет, кафедра радиофизики,  
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Ульяновская ул., д. 3  
(Статья поступила 11.11.2014; Подписана в печать 28.11.2014)*

Для экспериментальных исследований кинематики вязких волн и генерируемых ими вязковолновых течений удобными оказываются тела вращения, поскольку при их колебательно-вращательном движении на поверхности не равна нулю только тангенциальная компонента колебательной скорости. В этом случае оказывается возможным решение уравнений Навье–Стокса с использованием граничных условий прилипания жидкости к твердому телу и равенства нулю колебательной скорости волн на бесконечности. Представлены результаты сравнения экспериментальных исследований поля вязковолновых течений вязкой жидкости вблизи нескольких шаров с поверхностями, обладающими различными адгезионными свойствами. В качестве жидкости был выбран глицерин с кинематической вязкостью  $\nu = 6,4 \text{ см}^2/\text{с}$  при нормальных условиях. Об адгезионной способности судили по краевому углу смачивания твердой поверхности жидкостью. С увеличением значения колебательной скорости шара в случае поверхности гидрофобной (графит, парафин) наблюдаемое поле скоростей течений становится существенно отличным от поля вблизи поверхности, обладающей гидрофильными свойствами (металл, окрашенная поверхность) при прочих равных условиях. Такое различие в полях скоростей течений объясняется проскальзыванием жидкости в случае гидрофобной поверхности.

PACS: 62.10.+s 66.20.Cy УДК: 532.5.011 534-6 534-14

Ключевые слова: вязкость, вязкие волны, течение, жидкость, адгезия.

### ВВЕДЕНИЕ

При вращательно-колебательном движении сферы в вязкой жидкости около нее возникают вязковолновые течения. Такое движение жидкости происходит в силу поглощения импульса вязкой волны, генерируемой поверхностью сферы. Характер вязковолновых течений определяется соотношением вязких и инерционных сил. Эффективность передачи импульса от волнового движения к однонаправленному гидродинамическому оценивается из уравнения Навье–Стокса [1]. Для упруго-инерционных и вязких волн она определяется величиной поглощенного средой импульса и оказывается пропорциональной  $\alpha V_0^2$ , где  $\alpha$  — коэффициент поглощения, а  $V_0$  — амплитуда колебательной скорости волны в точке наблюдения. Как показано в представляемой работе, скорость течений при прочих равных условиях определяется и адгезионными свойствами поверхности твердой границы.

### 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ВЯЗКОВОЛНОВОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Кинематика явления исследовалась в глицерине методом визуализирующих частиц — мелких пузырьков

воздуха диаметром около 100 мкм. Такие частицы удовлетворяют условию равенства их собственной скорости движения окружающей их жидкости с точностью до 0,02% [2]. Вертикальный «срез» течения, фиксируемый фотоаппаратом, вырезался в жидкости с помощью источника света и оптической системы. Время экспозиции при фотографировании превышало период колебаний, так что движение частиц представляет собой треки. На примере фотографии (рис. 1) показан вид исследуемых течений — система, состоящая из двух внутренних [1] вихрей, расположенных симметрично экваториальной плоскости. По непосредственному наблюдению явления, фотографиям (рис. 1) и схеме течения (рис. 2) можно оценить направления и скорости течения в различных областях. Выбор указанного типа движения сферы обусловлен тем, что при осевом вращательно-колебательном движении она не вытесняет жидкость, поэтому в исследуемой системе нет потенциального движения жидкости как в случае сферы осциллирующей.

Величина скорости течения в поле вязких волн зависит от амплитуды смещения. В [1] отмечалась линейная зависимость радиальной компоненты скорости течения от амплитуды смещения осциллирующего тела в диапазоне числа Фруда  $Fr = A/\delta$  от 1 до 22.

Квадратичная зависимость величины скорости течения от амплитуды смещения колеблющегося тела  $A$ , отмечаемая в [3] для осциллирующей сферы, наблюдалась при малых значениях числа Фруда  $Fr = A/\delta$  и характерна для медленных течений (вязкие силы больше инерционных). В наших опытах число Фруда изменялось в пределах от 0,2 до 0,5.

\*E-mail: bgrach@rambler.ru

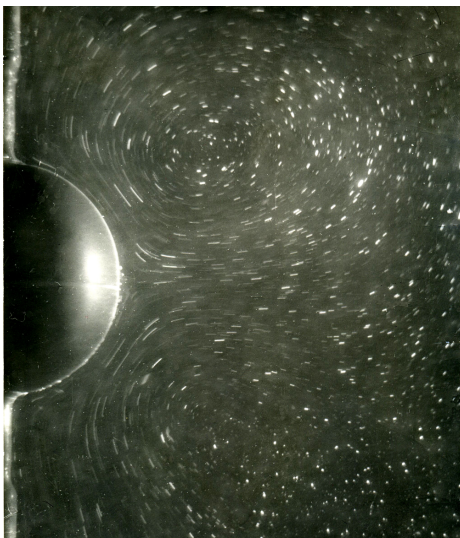
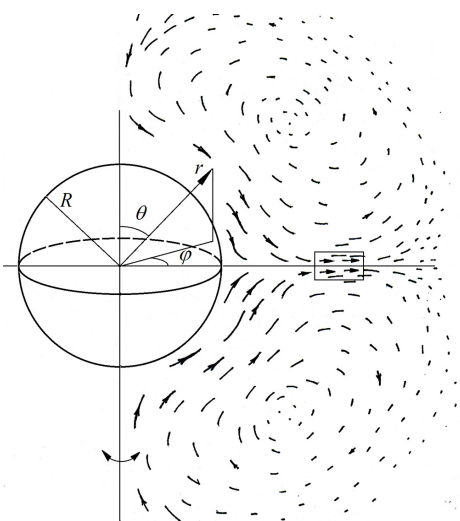


Рис. 1: Пример фотографии вязковолновых течений

Рис. 2: Схема вязковолновых течений. Прямоугольником выделена область стабилизации значений скорости  $U_r$ .

На рис. 1 и рис. 2 видно, что в экваториальной плоскости скорость течения имеет только одну радиальную составляющую  $U_r$ . На некотором удалении от поверхности сферы существует область, где величина скорости течения  $U_r$  стабилизируется. Такая область выбиралась из условия, чтобы значения скоростей в центре области не отличались от значений по краям более чем на 5%. На рис. 2 она обозначена прямоугольной рамкой. Кинематика течений, представленная ниже, исследовалась нами именно в этой области.

## 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано в представляемой работе далее, скорость вязковолнового течения зависит от адгезионных свойств поверхности источника. За меру таких свойств с учетом [4] был взят краевой угол смачивания  $\gamma$  жидкостью поверхности твердого тела, измеренный при нормальных условиях ( $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $p = 760$  мм.рт.ст) для глицерина с кинематической вязкостью  $\nu = 6,4$  см<sup>2</sup>/с. Поле скоростей вязковолновых течений исследовалось нами вблизи четырех поверхностей. Величины краевых углов для них приведены в табл. 1.

Таблица I: Величины краевых углов

Поверхность	$\gamma$ , град.
Медь	$42 \pm 2$
Окрашенная поверхность	$49 \pm 2$
Графит	$58 \pm 2$
Парафин	$59 \pm 2$

Поскольку вязкость глицерина довольно существенно зависит от температуры, ее во время опытов контролировали и поддерживали с точностью  $0,2^\circ\text{C}$ . Изменению температуры в этих пределах соответствует изменение вязкости глицерина примерно на 1%. Из фотографий течений по длине треков визуализирующих частиц и известном времени экспозиции рассчитывается скорость течений. Суммарная методическая погрешность таких расчетов скоростей составила не более 8%. На рис. 3 представлены результаты исследования скорости течений  $U_r$  в указанной области стабилизации от величины колебательной скорости поверхности сферы для пары поверхностей — окрашенной черной нитроокраской и покрытой графитом. Выбор именно этих поверхностей обусловлен целью снизить на фотографиях лишние блики, вуалирующие движение визуализирующих частиц. Температура жидкости составила в этом случае  $(17,0 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ . Каждая экспериментальная точка на графиках получена в результате усреднения не менее 5 измерений.

На рис. 4 представлены подобная зависимость для другой пары поверхностей, отличающихся адгезионными свойствами при температуре глицерина  $(18,0 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ . Это медь и парафин. Коэффициент преобразования по скорости движения вращательно-колеблющейся сферы — монополюсного источника — в вязковолновое течение во всех рассматриваемых случаях составляет примерно  $10^{-2}$ , в то время как для дипольного источника — поступательно осциллирующей сферы — такой коэффициент на порядок выше [1].

Хотя все экспериментальные зависимости мы аппроксимировали полиномом второй степени, на графиках (рис. 3 и рис. 4) для значений скоростей течения

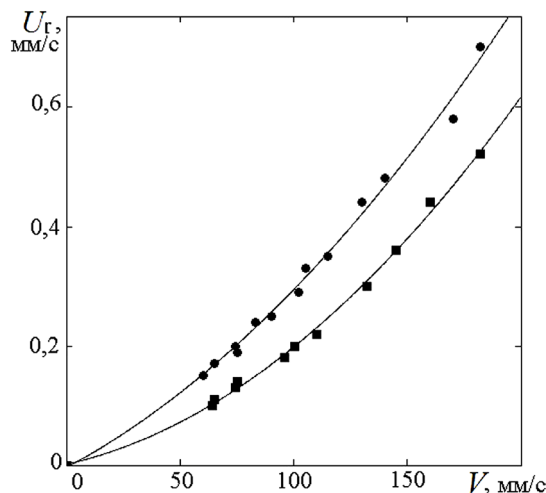


Рис. 3: График зависимости скорости течения от величины колебательной скорости поверхности сферы. Значками обозначены: ● — окрашенная поверхность, ■ — графит. Линии — аппроксимация зависимостей полиномами второй степени

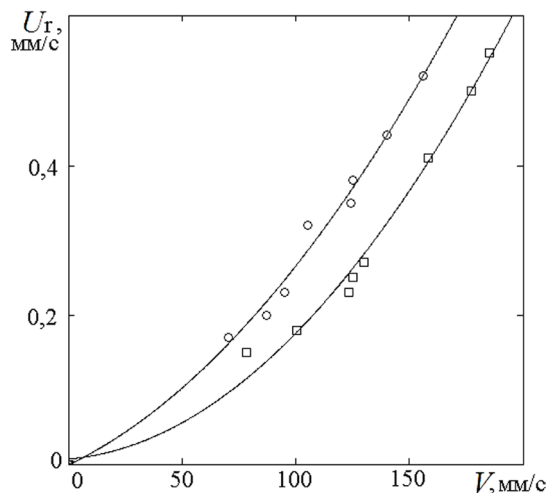


Рис. 4: График зависимости скорости течения от величины колебательной скорости поверхности сферы. Значками обозначены: ○ — медь, □ — парафин. Линии — аппроксимация зависимостей полиномами второй степени

$U_r$  в диапазоне колебательной скорости  $V$  поверхности шара выше 120 мм/с, что соответствует значению числа Фруда  $Fr \approx 0,5$ , аппроксимацию вполне удовлетворительно можно заменить линейной. Такой характер зависимости говорит о возрастании инерционных сил.

В случае как первой пары поверхностей, так и второй видно, что величины скоростей течения в случае гидрофильных поверхностей заметно выше скоростей вблизи поверхностей гидрофобных и превышают их примерно на 25%. То есть в последнем случае колеблющееся тело менее эффективно передает свой импульс жидкости. При таком характере течений для плохо смачиваемой поверхности следует допустить на-

личие проскальзывания жидкости относительно твердой границы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для численной характеристики влияния поверхностных сил на границе твердого тела и вязкой жидкости на исследуемые течения следует модифицировать, опираясь на [5], условия прилипания. С этой целью вводится коэффициент  $k$ , аналогичный «коэффициенту трения», следующим образом [6]:

$$\partial V / \partial t|_{y=0} = k(U - V|_{y=0}), \quad (1)$$

где  $y$  — нормальная к твердой поверхности координата,  $U = U_0 \exp(-i\omega t)$  — скорость поверхности, а  $V$  — скорость жидкости на границе. При  $k \rightarrow \infty$  выполняется условие прилипания, то есть  $V|_{y=0} \rightarrow U$ . Разрыв скорости в (1) вводится чисто формально: пространственный эффект более быстрого изменения колебательной скорости в вязкой волне вглубь жидкости вблизи плохо смачиваемой поверхности по сравнению с хорошо смачиваемой поверхностью сводится к эффекту локальному. В последнем случае, кроме того, для хорошо смачиваемых поверхностей, как отмечено в [4], вязкость в граничных слоях оказывается выше, что может толковаться как скольжение с отрицательным коэффициентом. Нами при экспериментальном исследовании вязких волн в глицерине вблизи совершающего вращательные колебания длинного цилиндра [7] показано, что в случае хорошо смачиваемых поверхностей колебательная скорость в вязкой волне уменьшается вглубь жидкости медленнее, чем это следует из решения уравнения Навье–Стокса с граничным условием прилипания. Рассчитанное из этих опытов значение вязкости непосредственно вблизи твердой поверхности оказалось примерно на порядок выше, уменьшаясь в пределах  $\delta/5$  ( $\delta$  — толщина пограничного слоя) до значений вязкости в «глубине» жидкости, определяемой обычными методами.

Решая совместно с введенным граничным условием (1) для колеблющейся в вязком полупространстве со скоростью  $U = U_0 \exp(-i\omega t)$  плоской границы уравнение Навье–Стокса в приближении вязкой несжимаемой жидкости, сводящееся в этом случае к уравнению  $\partial V / \partial t = \nu(\partial^2 V / \partial t^2)$  [8], получаем скорость жидкости:

$$V = \left( \frac{k}{k - i\omega} \right) U_0 \exp\left(-\frac{y}{\delta}\right) \exp i\left(\frac{y}{\delta} - \omega t\right), \quad (2)$$

где  $\delta = (2\nu/\omega)^{1/2}$ .

Из уравнения (2) для модуля скорости при  $k \rightarrow \infty$  получаем:

$$|V| \cong (1 - \omega^2/2k^2) |V|_{adh}, \quad (3)$$

где  $V_{adh}$  — решение для граничных условий прилипания.

Если учесть, что скорость течения  $U_r$  пропорциональна  $V^2$  (рис. 3 и рис. 4), то отсюда  $U_r$  оказывается равной:  $U_r \cong (1 - \omega^2/k^2)$ . Для поверхности, покры-

той графитом, рассчитанное значение коэффициента трения  $k$ , найденное из экспериментальных измерений скорости течений, составило  $120 \text{ с}^{-1}$ .

- 
- [1] Прохоренко П.П., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Ультразвуковая металлизация материалов. (Мн.: Наука и техника, 1987).
- [2] Скучик Е. Основы акустики. В 2 т. Т.1. (М.: Мир, 1976).
- [3] Chang Wang Yi. J. Sound and Vibration. **22**, N3. P.255. (1965).
- [4] Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности. (Долгопрудный: Интеллект, 2008).
- [5] Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. (М.: ГИТТЛ, 1955).
- [6] Грачев Б.Е., Залесский А.Г. О влиянии граничных условий на течения в поле вязких волн. Региональная VI конференция по распространению радиоволн. (СПб, 2000). С. 52.
- [7] Грачев Б.Е. Бутлеровские сообщения. **31**, №9. С.146. (2012).
- [8] Ландау Л.Д., Лифшиц В.М. Гидродинамика. (М.: Наука, 1988).

## Features of viscosity wave currents near to fluctuating firm borders with various adhesive properties

**B. E. Grachev**

*The St.-Petersburg State University, Faculty of Physics, Radio Physics Chair,  
Ulyanovskaya st. 3, Old Peterhof, St.-Petersburg, 198504, Russia  
E-mail: bgrach@rambler.ru*

It is the result of comparison of experimental researches of a field of viscosity wave current near to several spheres with the surfaces possessing various adhesive properties. The liquid is glycerol with kinematic viscosity  $\nu = 6,4 \text{ см}^2/\text{с}$  under normal conditions. Here as a measure of the adhesion force is the contact angle. With increase in value of oscillatory velocity of a sphere in case of the waterproof surface (graphite, paraffin) the observable field of current velocity of becomes essentially distinct from a field near to a surface possessing hydrophilic properties (the metal, the painted surface) with other things being equal. This difference of the velocity field for the hydrophobic surface currents can be explained by a slippage of the liquid.

PACS: 62.10.+s 66.20.Cy

Keywords: viscosity, viscous wave, current, liquid, adhesion.

Received 11.11.2014.

### Сведения об авторе

Грачев Борис Евгеньевич — старший преподаватель кафедры радиофизики физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, тел.: (812) 428-72-89, e-mail: bgrach@rambler.ru.