



## Динамика слоя вязкой жидкости на внутренней границе горизонтальной цилиндрической полости при модуляции скорости вращения<sup>1</sup>

Козлов В.Г., Зимасова А.Р., Козлов Н.В.

Пермский государственный гуманитарно–педагогический университет, Пермь

Экспериментально исследуется поведение границы раздела жидкостей с высоким контрастом вязкости в неравномерно вращающемся длинном горизонтальном цилиндре. Более вязкая жидкость имеет большую плотность и располагается вблизи границы полости в виде тонкого слоя под действием центробежной силы. В средней части полости располагается маловязкая жидкость меньшей плотности, в отсутствие модуляции скорости вращения граница раздела имеет форму кругового цилиндра. Изучается динамика межфазной границы в зависимости от толщины слоя вязкой жидкости, скорости вращения, амплитуды и частоты либраций.

Исследования направлены на разработку методов вибрационного управления формой межфазной границы во вращающемся длинном цилиндре. Эффективное осредненное действие либраций на границу раздела жидкостей с высоким контрастом вязкости было показано в [1] при изучении динамики двух жидкостей в круговой ячейке Хеле-Шоу, совершающей неравномерное вращение вокруг своей оси по закону  $\Omega = 2\pi f_{rot}(1 + \varepsilon \cos(2\pi f_{lib}t))$ . В работе экспериментально и теоретически исследованы равновесная форма и устойчивость межфазной границы. Были обнаружено несколько эффектов: при определенных соотношениях частоты либраций и скорости вращения граница смещается

в радиальном направлении в системе отсчета полости. Другой эффект проявляется в том, что с увеличением амплитуды модуляции скорости круговая граница раздела пороговым образом теряет устойчивость: на границе возникает азимутально периодический рельеф. Это связано с осцилляционной неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца, обусловленной тангенциальными колебаниями менее вязкой жидкости вблизи границы раздела с более вязкой.

Экспериментальная кювета представляет собой цилиндрическую полость (Рис. 1), выточенную в блоке из оргстекла в виде длинного параллелепипеда квадратного поперечного сечения. Длина рабочей полости  $L = 7.4$  см, радиус рабочей полости  $R = 3.0$  см. Кювета приводится во вращение вокруг горизонтальной оси шаговым двигателем.

Эксперименты проводятся в диапазоне частот вращения  $f_{rot} = \Omega_{rot}/2\pi = 3 - 6$  об/с и частот либрации  $f_{lib} = \Omega_{lib}/2\pi = 3 - 9$  Гц. Амплитуда модуляции скорости варьируется в диапазоне  $\varepsilon = 0 \div 0.7$ .

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект 23-11-00242.

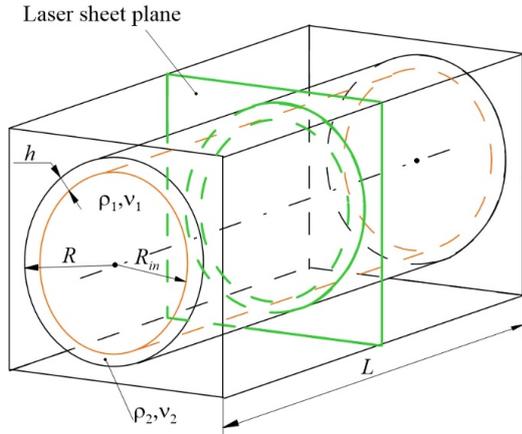


Рис. 1. Схематичное изображение экспериментальной кюветы и границы раздела в плоскости вертикального лазерного ножа

В ходе эксперимента форма радиальной границы вязкой жидкости, которая визуализируется родаминовым красителем, регистрируются с помощью скоростной видеокамеры. Видео-регистрация выполняется со стороны переднего прозрачного торца соосно с осью вращения кюветы.

В качестве жидкостей используются масло АК – 0.65 кинематической вязкостью  $\nu_1 = 1.02$  сСт и плотностью  $\rho_1 = 0.76$  г/см<sup>3</sup> и глицерин, кинематическая вязкость которого равняется  $\nu_2 = 820$  сСт, а плотность составляет  $\rho_2 = 1.26$  г/см<sup>3</sup>.

Глицерин окрашен родаминовым красителем, что позволяет с высокой точностью определить границу раздела жидкостей методом фоторегистрации с использованием красного светофильтра и освещения жидкостей лазером зеленого цвета. При съемке с торца кюветы камера фокусируется на границе раздела жидкостей в плоскости лазерного ножа, расположенного так, что лазерный нож про-

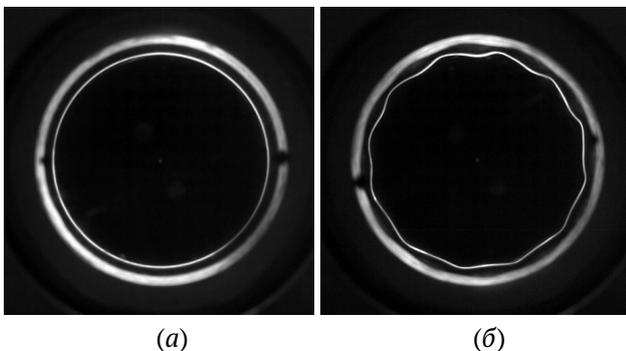


Рис. 2. Граница раздела жидкостей (толщина слоя  $h = 3.0$  мм) при модуляции скорости вращения при  $f_{rot} = 3$  об/с,  $f_{lib} = 4$  Гц: (а)  $\varepsilon = 0$ ; (б)  $\varepsilon = 0.55$

ходит по середине полости перпендикулярно оси вращения кюветы, освещая слой столба жидкости в центре полости.

Эксперименты проводятся на нескольких толщинах слоя вязкой жидкости  $h$ : 2.3 мм, 3.0 мм, 5.6 мм.

Эксперименты проводятся в центрифугированном состоянии системы, при этом вязкая жидкость, расположенная у стенки полости в виде коаксиального слоя, совершает вращение вместе с кюветой. В отсутствие модуляции скорости граница раздела жидкостей имеет круговую форму (Рис. 2(а)).

Обнаружено, что с повышением амплитуды модуляции скорости вращения граница раздела пороговым образом теряет устойчивость, на ней развивается квазистационарный рельеф с азимутальной периодичностью (Рис. 2(б)).

С увеличением амплитуды либраций высота квазистационарного рельефа на границе раздела увеличивается, при этом пространственный период рельефа на границе также возрастает (Рис. 3). Обнаружено, что при увеличении частоты либрации при фиксированной скорости вращения и за-

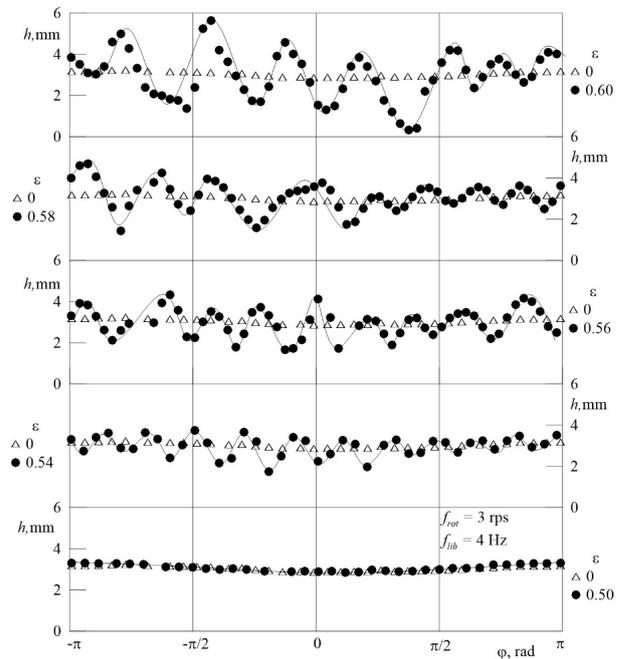


Рис. 3. Зависимость толщины слоя вязкой жидкости от угловой координаты в некоторый момент времени (в лабораторной системе, начало отсчета определяется направлением ускорения свободного падения) в отсутствие либраций и в надкритической области;  $f_{rot} = 3$  об/с,  $f_{lib} = 4$  Гц, толщина невозмущенного слоя  $h = 3.0$  мм

данной амплитуде либраций высота холмов рельефа увеличивается.

Исследования показали, что возникновение двумерного квазистационарного рельефа на межфазной границе связано с развитием осцилляционной неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и происходит пороговым образом при увеличении амплитуды модуляции скорости вращения. Результаты исследования устойчивости границы представлены в пространстве безразмерных параметров.

Обнаружено, что одним из определяющих параметром является безразмерная скорость вращения полости  $\omega_{rot} \equiv \Omega_{rot} h^2 / \nu$ , с увеличением которого пороговое значение вибрационного параметра возрастает.

### Список литературы

- [1] Kozlov V, Petukhova M, Kozlov N. Dynamics of liquids with high viscosity contrast in unevenly rotating Hele–Shaw cell // Phil. Trans. R. Soc. A. 2023. 20220082.