



Осцилляционная динамика фазового включения в осесимметричном вертикальном канале переменного сечения¹

Карпунин И.Э.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

Введение

Развитие методов интенсификации массообменных процессов во множестве технологических процессов является одним из ключевых направлений исследований. Применение каналов с периодически меняющимся вдоль оси радиусом [1, 2] с целью генерации нестационарных течений при постоянном течении жидкости активно исследуется в связи с практическим применением подобных технологий для интенсификации процессов переноса тепла и массообмена. Исследования осцилляционной динамики фазовых включений в осциллирующем потоке жидкости зачастую носят теоретический характер и в меньшей степени рассмотрены экспериментально. В работах [3, 4] представлен обзор литературы и подробно рассмотрен метод интенсификации процессов с использованием пульсаций и вибраций при наличии постоянного ненулевого течения в канале. Экспериментальные исследования динамики фазовых включений с твердой границей в осциллирующем потоке жид-

кости (при нулевом среднем расходе) в геометрии осесимметричного канала переменного сечения слабо представлены в литературе. Колебания жидкости относительно неподвижных стенок [5] и эластичных [6] приводят к генерации осредненных течений в жидкости. Важным результатом проведенных ранее исследований является то, что в областях умеренных и низких частот обнаружена генерация осредненных потоков, интенсивность которых уменьшается с понижением безразмерной частоты вибраций $\omega = \Omega R^2 / \nu$. В работе [7] показано, что гармонические колебания жидкости в канале переменного сечения возбуждают осредненный поток в виде системы тороидальных вихревых течений, структура и интенсивность которых определяются ω и пульсационным числом Рейнольдса Re . В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования осцилляционной динамики твердого сферического тела в вертикальном осесимметричном канале переменного сечения при колебаниях расхода жидкости.

Экспериментальная установка и методика

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый гидравлический контур, в ко-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 23-71-01103).

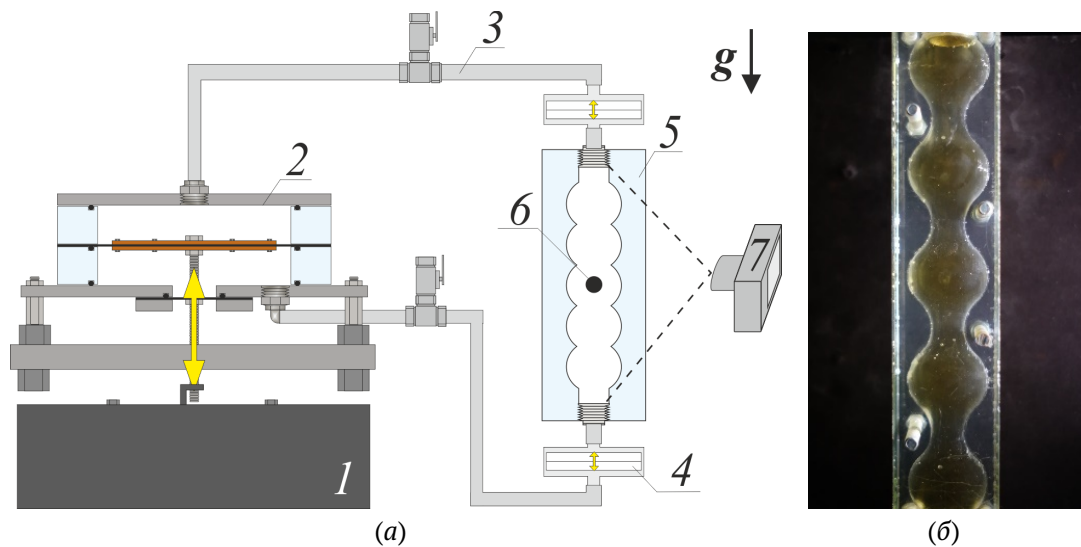


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), фотография осесимметричного канала (б)

торый включены электродинамический вибростенд 1, насос по типу «тяги—толкай» 2, система шлангов с кранами и разделительными мембранами 3 (Рис. 1(а)). Гармоническое изменение расхода прокачиваемой в контуре жидкости посредством разделительных мембран 4 сообщается кювете 5. Насос 2, работающий по принципу «тяги—толкай», обеспечивает гармоническое изменение объема прокачиваемой в замкнутом гидравлическом контуре жидкости по закону $Q = Q_0 \cos \Omega t$. Частота колебаний задается генератором и может изменяться в диапазоне $f \equiv \Omega/2\pi = 2 - 12$ Гц. Экспериментальная кювета 5 (Рис. 1(а), (б)), расположенная вертикально, представляет собой оргстеклянный параллелепипед размерами $60 \times 60 \times 150$ мм³. Кювета собирается из двух симметричных половин, в которых выфрезерованы пазы переменной глубины. В сборе получается осесимметричный канал переменного сечения. Радиусы канала в узком и широком участках составляют 6.2 мм и 15 мм, соответственно, пространственный период (расстояние между центрами сегментов канала) составляет 42 мм. Фазовое включение 6 представляет собой твердую пластиковую сферу диаметром $d = 5 - 8$ мм и плотностью $\rho = 1.38$ г/см³.

В экспериментах в качестве рабочей жидкости выступают водоглицериновые растворы различной массовой концентрации. Плотность рабочей жидкости варьируется с помощью растворения в ней соли (йодида натрия NaI или йодида калия KI) в различном процентном соотношении. Видеорегистрация положения фазового включения в кювете осуществляется камерой Fujifilm X-E4 (7) с частотой съемки 60 кадров в секунду. Оптическая ось камеры перпендикулярна плоскости кюветы, а плос-

кая внешняя боковая граница канала переменного сечения и близкие показатели преломления оргстекла и рабочих жидкостей снижают оптические искажения на искривленной границе канала. В экспериментах варьируются частота и амплитуда изменения расхода прокачиваемой через канал жидкости, относительные размеры включения, а также физические характеристики рабочей жидкости.

Результаты

Исследование колебаний жидкости в осесимметричном канале переменного сечения [7] показало, что осциллирующий поток жидкости приводит к генерации интенсивных осредненных потоков в каждом из сегментов канала (Рис. 2(а)). При малых безразмерных частотах первичные вихри занимают всю область в каждом из сегментов. Результаты предварительных экспериментов настоящего исследования показали, что в зависимости от безразмерной частоты колебаний наблюдаются различные режимы поведения для сферического твердого тела. Так, при малых частотах наблюдается замедление скорости движения включения в сужениях канала на фоне движения в поле силы тяжести. Тем самым, при относительно малых колебаниях жидкости наблюдается уменьшение средней скорости движения. При фиксированной частоте колебаний жидкости в канале при увеличении амплитуды наблюдается эффект удержания фазового включения (Рис. 2(б)). Осциллирующее движение столба жидкости генерирует осредненную силу, действующую на тело, величина которой зависит от параметров тела и его положения в канале. По достижении критической амплитуды осцилляций тело перестает двигаться вдоль канала и занимает квазистацио-

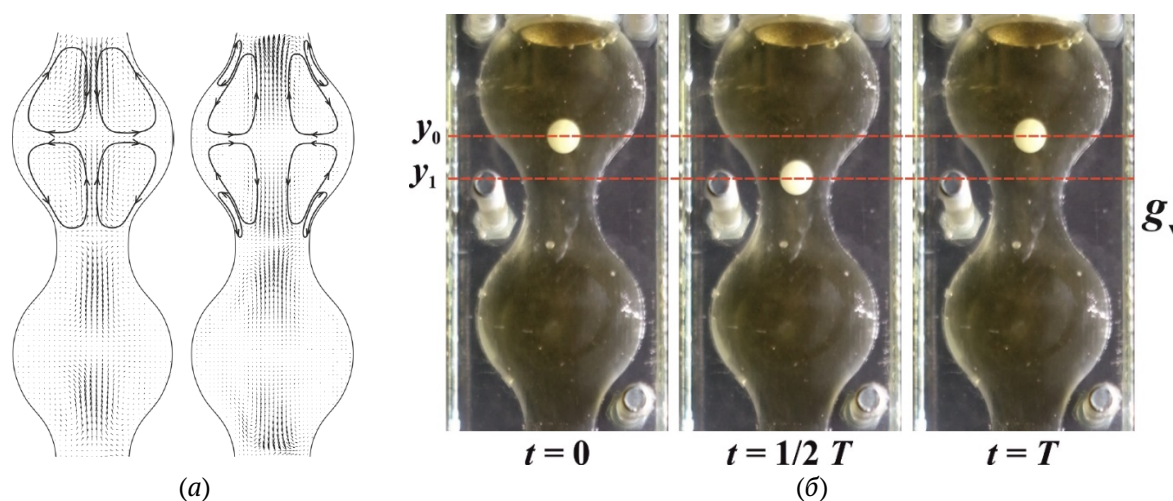


Рис. 2. Структура осредненных потоков в канале переменного сечения [7] в области малых безразмерных частот ω (а) и фотографии временной динамики фазового включения в течение одного периода колебаний при $f = 4$ Гц (б)

нарное положение в одной из ячеек вертикального канала. Сферическое тело удерживается осциллирующим потоком вблизи сужения канала, совершая при этом колебания относительно своего среднего положения. Квазистационарное положение определяется относительной плотностью и размером тела, а также безразмерной частотой. Осредненные потоки (Рис. 2 (а)), генерируемые осцилляциями жидкости в области низких безразмерных частот, вносят определенный вклад в равновесное положение фазового включения относительно канала переменного сечения. При уменьшении амплитуды колебаний жидкости амплитуда колебаний тела уменьшается и по достижении порогового значения тело проходит сужение канала и начинает движение вдоль оси канала.

Предварительные экспериментальные исследования в зависимости от амплитуды и частоты колебаний жидкости, относительного размера и плотности включения показали, что колебания жидкости в подобного рода системе приводят к ряду осредненных эффектов и свидетельствуют о возможности управления положением фазового включения в канале переменного сечения посредством осцилляционного воздействия.

Список литературы

- [1] *Blancher S., Creff R., Le Quere P.* Analysis of convective hydrodynamic instabilities in a symmetric wavy channel // *Physics of Fluids*. 2004. Vol. 16(10). P. 3726–3737.
- [2] *Lee B.S., Kang I.S., Lim H.C.* Chaotic mixing and mass transfer enhancement by pulsatile laminar flow in an axisymmetric wavy channel // *International journal of heat and mass transfer*. 1999. Vol. 42(14). P. 2571–2581.
- [3] *Chakravorty A.* Process intensification by pulsation and vibration in miscible and immiscible two-component systems // *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2018. Vol. 133. P. 90–105.
- [4] *Nishimura T., Murakami S., Kawamura Y.* Mass transfer in a symmetric sinusoidal wavy-walled channel for oscillatory flow // *Chemical engineering science*. 1993. Vol. 48(10). P. 1793–1800.
- [5] *Иванова А.А., Козлов В.Г.* Вибрационная конвекция при непостоятельных колебаниях полости (изотермический случай) // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2003. № 2. С. 25–32.
- [6] *Козлов В.Г., Сабиров Р.Р., Субботин С.В.* Осредненные течения в осциллирующей сфероидальной полости с эластичной стенкой // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2018. № 2. С. 16–26.
- [7] *Vlasova O.A., Karpunin I.E., Latyshev D.I., Kozlov V.G.* Steady flows of a fluid oscillating in an axisymmetric channel of variable cross-section, versus the dimensionless frequency // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32. P. 363–368.