

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА КОЛЕБАНИЯМИ ГРАНИЦЫ СМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

А.В. БУШУЕВА, Д.А. ПОЛЕЖАЕВ

Лаборатория вибрационной гидромеханики,
Пермский государственный гуманитарно-педагогический
университет, 614990, Пермь, Сибирская, 24

Обсуждаются результаты наблюдений за границей между двумя смешивающимися жидкостями с сильно отличающейся вязкостью в узком вертикальном канале (ячейке Хеле-Шоу). В отсутствие колебаний более плотная вязкая жидкость занимает нижнюю часть канала, легкая маловязкая жидкость – верхнюю, межфазная граница – горизонтальная и невозмущенная. При гармоническом изменении расхода межфазная граница совершает колебания и при определенных условиях теряет устойчивость: маловязкая жидкость проникает внутрь вязкой, образуя «пальчики». Обнаружено, что «пальчики» существуют ограниченное время и исчезают при перемешивании жидкостей. Проведено сравнение пространственного периода обнаруженных пальчиковых структур с известными результатами, полученными при монотонном вытеснении маловязкой жидкостью вязкой.

Ключевые слова: смешивающиеся жидкости, колебания, ячейка Хеле-Шоу, пальчиковая неустойчивость.

Наблюдаемые в пористых средах процессы массо- и теплопереноса в лабораторных условиях моделируют с помощью проведения экспериментов в радиальных или прямоугольных ячейках Хеле-Шоу. Примером моделируемых таким образом явлений является перемешивание жидкостей, возникающее при вытеснении одной жидкости другой. Перемешивание жидкостей является важным элементом многих природных и технологических процессов, таких как распространение загрязнений в почве [1], нефтедобыча [2] и

протекание химических реакций [3]. В покое контактирующие жидкости перемешиваются вследствие относительно медленной молекулярной диффузии. Однако при вытеснении маловязкой жидкостью более вязкой перемешивание интенсифицируется благодаря развитию неустойчивости Тейлора – Саффмана с последующим образованием на межфазной границе пальчиковых структур (fingering patterns) [4]. При изучении пальчиковых структур, как правило, рассматривается монотонное продавливание менее вязкой жидкости сквозь более вязкую [5, 6].

В нашей работе экспериментально изучается динамика границы между смешивающимися жидкостями в вертикальной ячейке Хеле-Шоу (используются легкая маловязкая вода и тяжелый вязкий глицерин). При этом техника эксперимента отличается от [5, 6]: жидкости совершают колебания вблизи неподвижной контактной линии (ее неподвижность обеспечивается высокой вязкостью глицерина). В течение одного колебания половину времени невязкая жидкость движется в сторону более вязкой, другую половину времени она движется в противоположном направлении. Поэтому в первую половину колебания появляются условия для возникновения пальчиковой неустойчивости. Ранее подобная методика была успешно апробирована при изучении пальчиковой неустойчивости на границе несмешивающихся жидкостей в радиальной [7] и прямоугольной [8] ячейках Хеле-Шоу.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты со смешивающимися жидкостями проводятся в вертикальном прямоугольном канале (ячейке Хеле-Шоу) высотой $l = 250$ мм, шириной $h = 147$ мм и толщиной $d = 2.5$ мм. Канал образуется при контакте двух частей кюветы, схема которой показана на рис.1.

Наблюдения проводятся в проходящем свете через стеклянную пластину 1 толщиной 10 мм. Толщина канала определяется высотой длинных текстолитовых пластин 2, которые приклеены к одной из стеклянных пластин. Длина пластин равна длине ячейки и составляет 250 мм, ширина пластин равна 5 мм, а высота равна 2 мм. Сверху пластины полностью закрываются резиновыми лентами (на рис.1 не показаны) с целью герметизации боковых границ ячейки при соединении двух частей кюветы. Толщина пленки равна 0.5 мм, так что общая высота стенок ячейки составляет $d = 2.5$ мм.

Скелет обеих частей кюветы изготовлен из алюминиевой плиты 3 толщиной 6 мм. К алюминиевой подложке с помощью болтов 4

крепится плексигласовая пластина 5, в которой, как и в алюминиевой плите, вырезано окно для стеклянных пластин. По обеим сторонам ячейки в плексигласовой пластине вырезаны карманы, соединяющие рабочий канал с отверстиями в алюминиевой подложке для штуцеров, служащих для включения кюветы в гидравлический контур (рис.2). Две части кюветы соединяются между собой с помощью болтов 6. Для обеспечения герметичности соединения по периметру кюветы уложен резиновый уплотнитель 7.

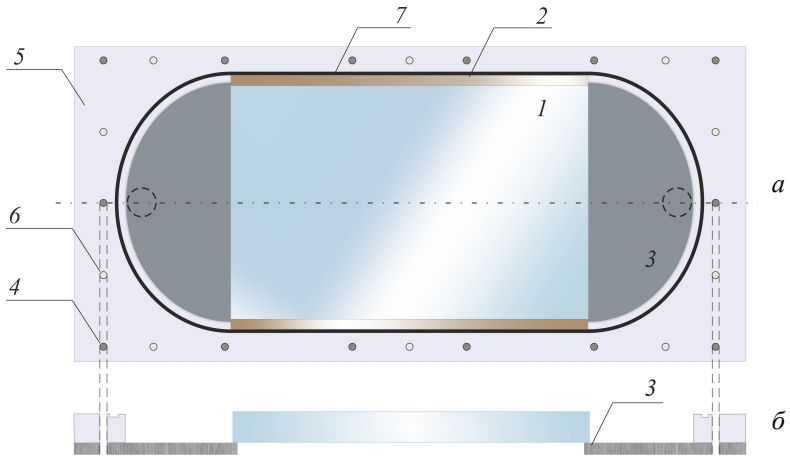


Рис.1. Схема нижней половины кюветы: вид сверху (а) и вид сбоку в сечении, показанном штрих-пунктирной линией (б)

Осциллирующее движение жидкости в гидравлическом контуре обеспечивается двигателем, кривошипно-шатунным механизмом и системой мембран. С помощью двигателя можно управлять частотой колебаний жидкости, а изменение положения пальца кривошипно-шатунного механизма позволяет изменять амплитуду колебаний. В качестве рабочих жидкостей используется чистый глицерин с кинематической вязкостью $\nu_g = 7.45$ Ст и плотностью $\rho_g = 1.26$ г/см³ и подкрашенная с помощью пищевого красителя вода ($\nu_w = 0.01$ Ст и $\rho_w = 1.0$ г/см³).

Методика заполнения кюветы жидкостями следующая. Сначала вертикальная кювета заполняется наполовину тяжелой жидкостью (глицерин) через нижний штуцер. Затем через тонкое отверстие в верхнем торце кюветы (не показано на рис.1) заливается вода. В

процессе заполнения кюветы жидкостями между ними образуется межфазная граница, которая в отсутствие колебаний остается невозмущенной длительное время (в силу малой интенсивности диффузии: коэффициент диффузии $D = 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ [9]).

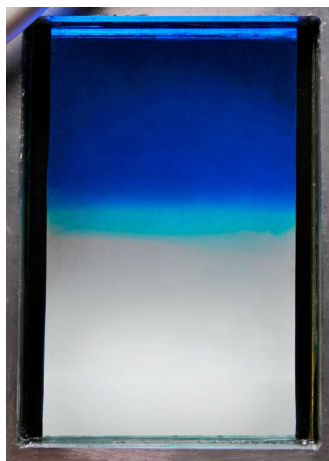


Рис.2. Фотография рабочего поля экспериментальной кюветы (после проведения эксперимента)

Кювета заполняется жидкостями примерно в равных объемах, так что в начале эксперимента межфазная граница находится в середине ячейки Хеле-Шоу. Наблюдение за межфазной границей проводится с помощью видеокамеры, которая устанавливается напротив кюветы. Для освещения ячейки используется светодиодный осветитель с рассеивателем, который устанавливается с противоположной по отношению к камере стороны кюветы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При включении двигателя межфазная граница приходит в колебательное движение вдоль вертикали. На рис.3 приведены фотографии границы в различные моменты времени в течение первого периода колебаний после начала движения. О степени перемешивания жидкостей можно судить по цвету межфазной границы. В начале эксперимента граница резкая – вода и глицерин полностью разделены (рис.3а).

Когда жидкости начинают движение, вода проникает внутрь глицерина в средней части канала в виде «языка» (рис.3б). Под-

вижная межфазная граница оказывается неустойчивой – вблизи точки максимального смещения в зоне перемешивания возникают пальчиковые структуры (рис.3*в–д*). Ширина λ и длина L «пальчиков» примерно одинаковы. Исключение составляют пальчиковые образования вблизи боковых границ – их длина несколько больше, чем у «пальчиков» в середине ячейки. При движении воды вверх «пальчики» исчезают, межфазная граница снова становится плоской (рис.3*е*).

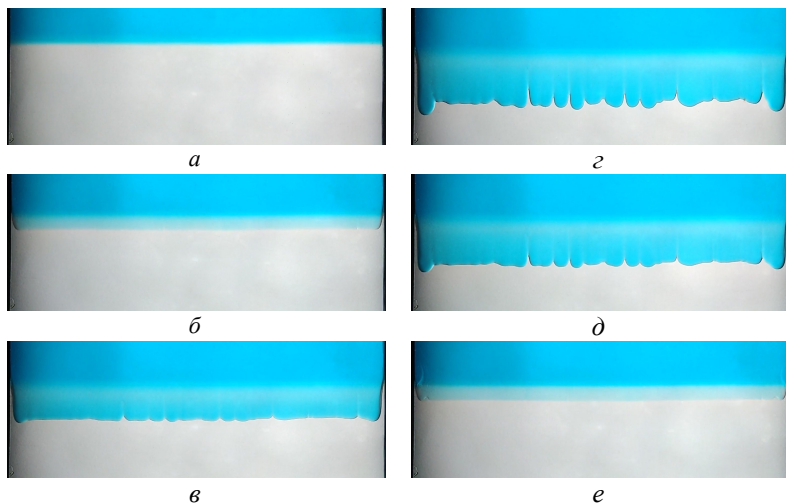


Рис.3. Межфазная граница в различные моменты колебательного цикла: $tf = 0, 1/6, 1/3, 1/2, 2/3$ и 1 (*a–e*); $f = 1.08$ Гц, $b = 1.1$ см

Отметим, что не во всех проведенных поисковых экспериментах в начальной стадии опыта наблюдались пальчиковые структуры. По-видимому, для их образования требуется достичь критической амплитуды колебаний.

Наблюдения за межфазной границей длятся несколько минут (несколько десятков периодов колебаний). На рис.4 показана межфазная граница в течение нескольких минут в фазе максимального смещения контактной линии. Первое, что обращает на себя внимание, «пальчики» существуют только ограниченное количество периодов колебаний (рис.4*а–д*). Также интересно, что в зоне перемешивания жидкостей сначала возникает, а позднее исчезает, узкая

горизонтальная область низкой концентрации окрашенной жидкости. Физические причины появления такой области пока неясны.

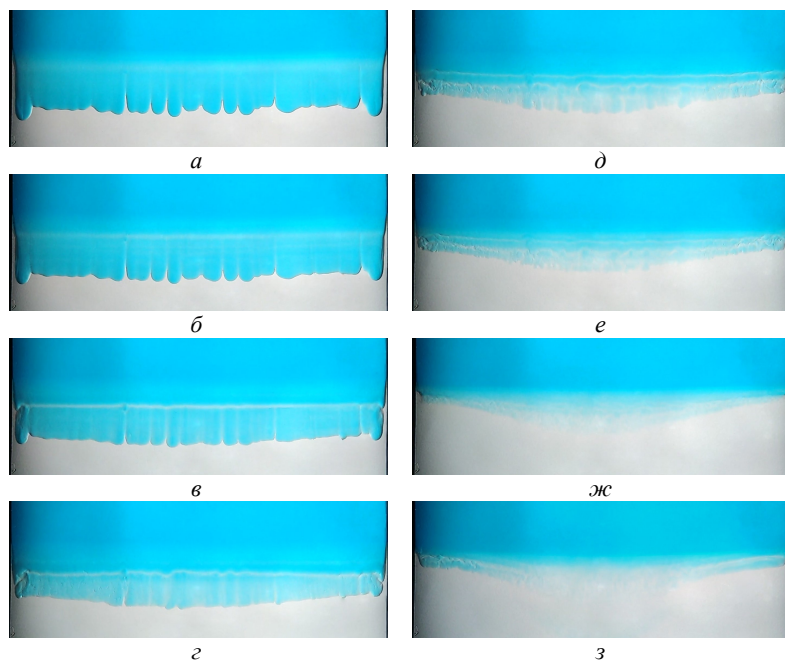


Рис.4. Временная динамика межфазной границы в фазе ее максимального смещения в сторону вязкой жидкости: $t = 1, 3, 6, 10, 20, 30, 60$ и 180 с (а–з)

Разрушение пальчиковых структур сопровождается изменением формы межфазной границы – изначально прямая горизонтальная граница становится изогнутой (рис.4г–ж). По истечении нескольких десятков секунд межфазная граница в центре ячейки также разрушается. На рис.4з граница резкая только вблизи боковых стенок ячейки и отсутствует в ее центре. В центре ячейки вода проникает в глицерин намного глубже, чем по краям; ее концентрация в этой области невелика, и на фотографии рис.4з область перемешивания трудноразличима.

На рис.5 приведены фотографии межфазной границы для случая, когда концентрация красителя в воде была значительно увеличена.

Это позволило изучить структуру области перемешивания жидкостей и выделить четыре качественно отличающиеся области:

1. прозрачная область, занимаемая чистым глицерином;
2. однородно и ярко окрашенная в синий цвет область, занимаемая чистой водой;
3. окрашенная в голубой цвет область полного перемешивания воды и глицерина;
4. окрашенная в бирюзовый цвет область частичного перемешивания жидкостей.

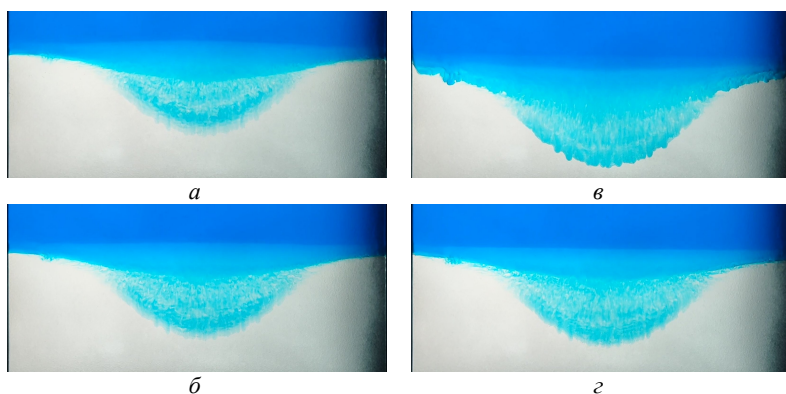


Рис.5. Межфазная граница в различные моменты колебательного цикла: $tf = 0, 1/4, 1/2$ и $3/4$ (а-г); $f = 1.50$ Гц, $b = 0.75$ см. Фотографии получены через 100 с после начала эксперимента

Область полного перемешивания жидкостей расширяется по мере удаления от боковых стенок. По-видимому, это связано с тем, что амплитуда колебаний также растет по мере приближения к центру ячейки. Таким образом, ширина области полного перемешивания определяется амплитудой колебаний.

В области частичного перемешивания жидкостей наибольшая яркость наблюдается на ее периферии, и это позволяет визуализировать мелкие периодические структуры в виде «пальчиков», вытянутых вдоль направления колебаний. «Пальчики» наиболее отчетливы в фазе наибольшего смещения от контактной линии (рис.5в). Наблюдения показывают, что с течением времени область проникновения воды в глицерин монотонно увеличивается, а положение «пальчиков» внутри них не изменяется.

Проведенные эксперименты позволяют измерить ширину мало-вязких «пальчиков» и провести сравнение результатов измерений с данными других исследований. Согласно пионерской работе [10], наиболее опасными на границе двух смешивающихся жидкостей являются возмущения с длиной волны $\lambda_m \rightarrow 0$. Тем не менее, в экспериментах, когда маловязкая жидкость проникает в вязкую жидкость, наблюдаются пальчиковые структуры конечной ширины.

В [11, 12] проведены экспериментальные исследования пальчиковой неустойчивости при больших скоростях движения маловязкой жидкости U , т.е. в пределе больших чисел Пекле

$$Pe \equiv \frac{Ud}{D} \gg 1,$$

где d – толщина ячейки Хеле-Шоу, D – коэффициент диффузии.

Обнаружено, что ширина «пальчиков» зависит только от толщины зазора d и имеет величину $\lambda_{exp} = (4 - 5)d$. Пальчиковые структуры аналогичного размера наблюдались также в экспериментах [13], когда неустойчивость провоцируется разностью плотностей между тяжелой верхней и легкой нижней жидкостями (неустойчивость Рэлея – Тейлора).

В нашей работе обнаружено, что при частоте $f = 1.08$ Гц и амплитуде $b = 1.1$ см средняя ширина образующихся «пальчиков» равна $\lambda_1 = 0.54 \pm 0.11$ см, а при $f = 1.50$ Гц и $b = 0.75$ см – $\lambda_2 = 0.46 \pm 0.08$ см. Эти эксперименты проведены в условиях, когда

$$Pe \equiv \frac{Ud}{D} = \frac{2\pi b f d}{D} \sim 10^5,$$

и их результаты можно сравнить с данными [11–13]. С учетом экспериментальной погрешности можно предположить, что пространственный период наблюдаемых пальчиковых структур одинаковый $\lambda_1 = \lambda_2 \equiv \lambda$ и не зависит от частоты и амплитуды колебаний. Этот результат качественно согласуется с результатами [11–13]. Пространственный период новых пальчиковых структур отличается от уже известных примерно вдвое, так как при толщине зазора $d = 0.25$ см образуются пальчиковые структуры с пространственным периодом $\lambda \approx 0.5$ см, что соответствует $2d$.

Результаты исследований являются новыми. Выяснение закономерностей развития пальчиковой неустойчивости требует проведения дальнейших исследований.

Закключение. Проведены первые экспериментальные исследования динамики границы раздела смешивающихся жидкостей при наличии колебаний. Обнаружено, что при колебаниях достаточной интенсивности межфазная граница испытывает неустойчивость к появлению «пальчиков» маловязкой жидкости внутри вязкой. Ширина «пальчиков» определяется только толщиной зазора ячейки Хеле-Шоу и не зависит от частоты и амплитуды колебаний. Этот результат качественно согласуется с данными других исследований о возникновении пальчиковой неустойчивости на границе смешивающихся жидкостей при монотонном движении маловязкой жидкости внутри вязкой. Наблюдения показывают, что пальчиковые структуры разрушаются после нескольких колебаний, а зона перемешивания жидкостей приобретает сложную форму.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края и РФФИ (грант 20-41-596011). Авторы благодарят О.А. Власову за помощь в проведении экспериментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. *De Wit A., Bertho Y., and Martin M.* Viscous fingering of miscible slices. // *Phys. Fluids*. 2005. Vol. 17 (5). 054114.
2. *Lake L.W.* Enhanced Oil Recovery. Prentice-Hall. 1989. 550 p.
3. *Loodts V. et al.* Control of convective dissolution by chemical reactions: General classification and application to CO₂ dissolution in reactive aqueous solutions // *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 113 (11). 114501.
4. *Homsy G.M.* Viscous fingering in porous media. // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1987. Vol. 19 (1). P. 271 – 311.
5. *Chui J.Y., de Anna P., and Juanes R.* Interface evolution during radial miscible viscous fingering. // *Phys. Rev. E*. 2015. Vol. 92 (4), 041003.
6. *Sharma V. et al.* Control of radial miscible viscous fingering // *J. Fluid Mech.* 2020. Vol. 884. A16.
7. *Kozlov V., Karpunin I., and Kozlov N.* Finger instability of oscillating liquid–liquid interface in radial Hele-Shaw cell. // *Phys. Fluids*. 2020. Vol. 32 (10). 102102.
8. *Vlasova O. and Kozlov V.* Oscillatory dynamics of two liquids interface in straight narrow gap // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1809. 012028.

9. *D'Errico G. et al.* Diffusion coefficients for the binary system glycerol + water at 25 C. A velocity correlation study // *J. Chem. Eng. Data*. 2004. Vol. 49 (6). P. 1665–1670.
10. *Saffman P.G. and Taylor G.I.* The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. // *Proc. R. Soc. Lond. A*. 1958. Vol. 245 (1242). P. 312–329.
11. *Paterson L.* Fingering with miscible fluids in a Hele Shaw cell // *Phys. Fluids*. 1985. Vol. 28 (1). P. 26–30.
12. *Lajeunesse E. et al.* 3D instability of miscible displacements in a Hele-Shaw cell // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 79(26). P. 5254.
13. *Fernandez J. et al.* Density-driven unstable flows of miscible fluids in a Hele-Shaw cell // *J. Fluid Mech.* 2002. Vol. 451. P. 239–260.

RESULTS OF OBSERVATION OF THE MISCIBLE FLUIDS INTERFACE OSCILLATIONS

A.V. BUSHUEVA, D.A. POLEZHAEV

Abstract. The results of observations of the boundary between two miscible fluids with strongly differing viscosity in a narrow vertical channel (Hele-Shaw cell) are discussed. In the absence of vibrations, a denser viscous fluid occupies the lower part of the channel, a light low-viscosity fluid occupies the upper part, and the interface is horizontal and undisturbed. When the flow rate changes periodically, the interface oscillates and, under certain conditions, loses its stability: a low-viscosity liquid penetrates into a viscous one, forming "fingers". It was found that the "fingers" exist for a limited time and disappear when the liquids are stirred. A comparison is made of the spatial period of the detected finger structures with the known results obtained during monotonic displacement by a low-viscosity liquid with a viscous one.

Key words: miscible fluids, oscillations, Hele-Shaw cell, viscous fingering.